

Alma Mater Studiorum – Università di Bologna

DOTTORATO DI RICERCA

Disegno e Metodi dell'Ingegneria Industriale

Ciclo XXI

**Settore scientifico disciplinare di afferenza:** ING-IND/15

TITOLO TESI

**Studio e Sperimentazione di Interfaccia Uomo-Macchina  
Innovative con Applicazioni all'Air Traffic Management**

**Presentata da:** Ing. Sara Bagassi

**Coordinatore Dottorato**

**Relatore**

**Chiar.mo Prof. Ing. Franco Persiani**

**Chiar.mo Prof. Ing. Franco Persiani**

**Esame finale anno 2008**



# Indice

<b>Introduzione.....</b>	<b>1</b>
<b>Capitolo 1 .....</b>	
<b>L'evoluzione dei Sistemi Complessi verso Elevati Gradi di Automazione .....</b>	<b>5</b>
1.1. Sistemi complessi: definizioni .....	5
1.2. Tecniche per la modellazione di sistemi complessi .....	10
1.4. Automazione ed informatizzazione .....	14
1.5. La necessità di interfaccia uomo-macchina.....	20
<b>Capitolo 2 .....</b>	
<b>Interfaccia Uomo-Macchina e Interfaccia Uomo-Computer: Trend di Sviluppo...21</b>	
2.1. Definizioni.....	21
2.2. Principi fondamentali per la progettazione di HMI.....	23
2.3. L'approccio " <i>user centered</i> " .....	30
2.3.1. Definizione dei requisiti .....	32
2.3.2. Valutazione.....	34
2.4. Possibili scenari evolutivi per le HCI. Connessione, intelligenza e realismo. ....	35
2.4.1. Autonomia ed intelligenza .....	36
2.4.2. Connessione e interoperabilità.....	36
2.4.3. Realismo .....	38
2.5. Realtà virtuale e computer graphics.....	38

2.5.1.	Stereoscopia .....	40
2.5.2.	Dispositivi di visualizzazione.....	41
2.5.3.	Dispositivi di interazione .....	46
<b>Capitolo 3 .....</b>		
<b>Il Sistema Traffico Aereo e il Ruolo delle Interfaccia .....</b>		<b>49</b>
3.1.	Cenni storici .....	49
3.2.	Il sistema traffico-aereo .....	51
3.2.1.	Principali Obiettivi del Servizio del Traffico Aereo.....	52
3.2.2.	Organizzazione degli spazi aerei.....	53
3.2.3.	Classificazione degli spazi aerei.....	58
3.2.4.	Le rotte ATS e le rotte R-NAV .....	59
3.2.5.	La designazione di rotta, punto significativo, SID o STAR .....	59
3.3.	L'automazione dei servizi ATC .....	62
3.4.	Ambiti di interesse per lo sviluppo di applicazioni innovative: training and operational .....	64
<b>Capitolo 4 .....</b>		
<b>Progettazione, sviluppo e valutazione di un'interfaccia 4D per l'ATC .....</b>		<b>65</b>
4.1.	Motivazione .....	65
4.2.	Stato dell'arte.....	66
4.3.	Progettazione dell'interfaccia.....	68
4.3.1.	Definizione dei requisiti.....	68
4.3.2.	Sviluppo delle soluzioni progettuali e del prototipo di interfaccia....	71



4.4. Valutazione .....	79
<b>Capitolo 5 .....</b>	
<b>Sviluppo di uno strumento innovativo per l'addestramento degli operatori ATC87</b>	
5.1. Le attività di addestramento.....	87
5.2. Descrizione del sistema.....	90
5.2.1. Il simulatore di volo.....	90
5.2.2. Il simulatore di scenario .....	90
5.2.3. Il sistema di comunicazione .....	92
5.3. Procedura di addestramento .....	92
5.4. TABO (Tabletop At uniBO) .....	95
5.4.1. Stato dell'arte.....	96
5.4.2. Descrizione del sistema.....	97
5.4.3. Progettazione del layout .....	99
5.4.4. Realizzazione .....	101
<b>Conclusioni .....</b>	<b>103</b>
<b>Appendice A - Lista degli acronimi e delle abbreviazioni.....</b>	<b>105</b>
<b>Appendice B - Valutazione: risultati e questionari .....</b>	<b>111</b>
<b>Bibliografia .....</b>	<b>117</b>



# Introduzione

Sin dall'antichità l'uomo ha avuto come obiettivo la realizzazione e lo sviluppo di prodotti utili a soddisfare le proprie esigenze di sopravvivenza, mobilità e comfort. Con l'evolversi delle società, le necessità dell'uomo si sono trasformate, fungendo da motore per il progresso tecnologico e portando alla realizzazione di prodotti che raggiungevano, in alcuni casi, alti gradi di complessità. Di conseguenza si è iniziato a porre una grande attenzione allo studio di tecniche per l'integrazione dei sottosistemi costituenti il prodotto finale.

Ora, nel giro di pochi decenni, la complessità dei sistemi e la diffusione pervasiva dell'informatica e dell'elettronica sono cresciute così tanto da rendere necessaria, al fine di realizzare i sistemi moderni, l'applicazione congiunta di una grande varietà di discipline principalmente ingegneristiche. Le tante specializzazioni che cooperano su un progetto spesso incontrano delle difficoltà nella comprensione reciproca poiché abituate ad utilizzare notazioni, terminologie e convenzioni differenti. Inoltre, i sottosistemi che risultano da tali discipline devono essere integrati in un unico sistema capace di soddisfare le esigenze dell'utente finale. Una corretta ed efficace interazione da parte dell'utente con un sistema ad alto contenuto tecnologico, e composto da una moltitudine di sottosistemi, è uno degli obiettivi più importanti di chi progetta un prodotto moderno.

Lo studio dei principi di usabilità e della progettazione di strumenti di interazione adeguati all'utilizzo del prodotto da parte dell'uomo si è fatto strada tra le discipline classiche dell'ingegneria, fino a guadagnarsi un posto di grande rilievo in alcuni settori industriali di punta come ad esempio l'*automotive*, il settore aeronautico o quello informatico (software).

Nell'elaborato che segue viene affrontato il tema della progettazione delle HMI (*Human Machine Interface*) e della loro evoluzione, legata principalmente alla crescente complessità dei sistemi con cui permettono l'interazione.

Il lavoro presentato nella tesi riguarda la realizzazione di una piattaforma sperimentale, basata sull'impiego di tecnologie di simulazione, concepita come strumento per l'indagine e la validazione di concetti innovativi per l'interazione con sistemi complessi. Al fine di applicare una metodologia di tipo *user-centred*, che prevede di costruire il processo di progettazione a partire dall'analisi delle attività svolte da un operatore, è stato individuato un settore di riferimento su cui elaborare due casi applicativi. Il settore dell'Air Traffic Management fornisce un caso interessante su cui sviluppare la ricerca sull'interazione dell'uomo con sistemi complessi. Il controllore, infatti, deve interagire con il sistema traffico aereo attraverso display e comandi mediante i quali vengono gestite una moltitudine di informazioni in continua evoluzione.

Nel primo capitolo si analizza il concetto di sistema complesso, descrivendone gli aspetti fondamentali che riguardano la definizione, la struttura, la modellazione e i metodi di comando e controllo. Relativamente a quest'ultimo aspetto, si pone particolare attenzione all'evoluzione di taluni sistemi verso gradi di automazione e informatizzazione sempre più elevati. In questo scenario assume un ruolo preponderante l'interfaccia uomo-macchina (HMI) che si interpone tra l'uomo e tali sistemi.

Il secondo capitolo si concentra sullo studio delle interfaccia approfondendone i moderni metodi di classificazione, le metodologie di progettazione e di valutazione facendo riferimento a settori industriali particolarmente sensibili, per ragioni di sicurezza o di efficienza, all'impiego di strumenti di comando e controllo efficaci. Successivamente, attraverso un'analisi critica, viene descritta un'ipotesi relativamente all'evoluzione futura delle interfaccia uomo-computer anche rispetto agli attesi sviluppi tecnologici principalmente nel campo della simulazione distribuita. Tra gli aspetti caratterizzanti in questo ambito si evidenziano l'inter-

connessione tra diversi sistemi, il grado di intelligenza e il grado di realismo. Il realismo delle applicazioni è strettamente correlato all'impiego di tecniche di realtà virtuale e computer grafica. Vengono quindi descritte ed analizzate le principali tendenze in questi due ambiti tecnologici.

Nel terzo capitolo la problematica generale della progettazione di interfaccia per la gestione di sistemi fortemente automatizzati viene contestualizzata nel settore specifico del controllo del traffico aereo. Il sistema traffico aereo è quindi descritto e analizzato in relazione al forte aumento di traffico previsto per i prossimi decenni e all'evoluzione dei sistemi di gestione e controllo. La crescita ed evoluzione del sistema traffico aereo comporta innovazione sia nei sistemi per la gestione operativa (*operational*) del traffico sia nei sistemi per l'addestramento degli operatori (*training*).

Nel quarto e quinto capitolo vengono descritte le applicazioni che sono state sviluppate nell'ambito del Dottorato di Ricerca in relazione ai due ambiti *operational* and *training*.

Una prima applicazione riguarda l'ambito operativo: viene proposta una interfaccia innovativa per il controllo del traffico aereo basata sul concetto 4D. Tutti i dispositivi di visualizzazione attualmente in uso forniscono all'operatore una rappresentazione bidimensionale di uno spazio che nella realtà è tridimensionale. Attraverso l'impiego di strumenti di computer grafica e di realtà virtuale è stato creato un ambiente virtuale tridimensionale che riproduce lo scenario reale. L'utilizzo di questi strumenti, inoltre, permette l'analisi dello scenario da più punti di vista e l'interazione con la variabile temporale. La variabile tempo viene gestita attraverso l'impiego di un algoritmo di predizione della traiettoria futura del velivolo, creato ed implementato utilizzando un approccio originale che si avvale sia di dati provenienti dalle procedure standard di volo sia dei dati provenienti dal velivolo (stati del velivolo). Per questa applicazione sono state condotte delle valutazioni, in termini di usabilità ed

efficacia degli strumenti proposti, da parte di operatori del controllo del traffico aereo i cui risultati sono descritti ed analizzati nell'elaborato.

La seconda applicazione è costituita da un sistema per l'addestramento basato sulla simulazione distribuita. Partendo dalle criticità della fase di familiarizzazione al volo, che costituisce parte dell'addestramento per gli operatori del controllo del traffico aereo, si evidenzia la necessità di uno strumento che metta più in evidenza gli aspetti legati alle comunicazioni terra-bordo-terra e al controllo del traffico aereo rispetto a quelli di controllo del velivolo. Il sistema proposto è un dispositivo di visualizzazione stereoscopica a proiezione su piano orizzontale, connesso ad un simulatore di volo, sul quale viene riprodotta una moviola virtuale della sequenza di volo, evidenziando così i possibili effetti, dovuti ad una comunicazione errata o imprecisa, sui i tempi di reazione del pilota e sull'accuratezza nell'esecuzione del comando. In questa parte dell'elaborato si descrivono nel dettaglio anche le fasi di progettazione e realizzazione del dispositivo di realtà virtuale, denominato TABO (TAbletop at uniBO).

# Capitolo 1

## L'evoluzione dei Sistemi Complessi verso Elevati Gradi di Automazione

### 1.1. Sistemi complessi: definizioni

La teoria dei sistemi complessi fornisce una prospettiva attraverso la quale è possibile analizzare e comprendere sistemi quali: il cervello, le relazioni sociali e familiari, i mercati azionari, la società, gli ecosistemi, le strategie di coordinazione (stormi di uccelli, strategie di gioco a squadre, ecc.), il traffico. Oltre al fascino di poter comprendere fenomeni legati alla natura, queste teorie risultano interessanti in quanto costituiscono un'area di ricerca multidisciplinare che può interessare le scienze matematiche, fisiche, informatiche, ingegneristiche, biologiche ed economiche e sociali.

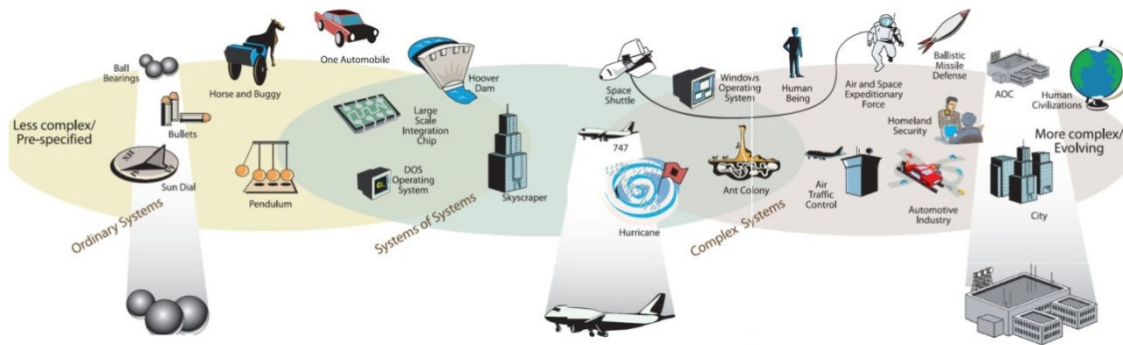


Figura 1-1. Classificazione di alcuni sistemi, naturali e non, in base al grado di complessità.

All'approccio **riduzionistico**, che prevede la scomposizione del sistema in parti elementari seguito dallo studio del comportamento di ciascun elemento, e che ha dominato la scienza fino a qualche decennio fa producendo notevoli risultati, si affianca il più recente approccio **olistico**, complementare al riduzionismo, nel quale però il comportamento del sistema viene interpretato come risultato delle relazioni tra le sue parti. L'ottica dei SC (Sistemi Complessi) si focalizza quindi sullo studio delle **relazioni** tra gli elementi del sistema e tra il sistema e l'ambiente. In questo scenario è bene distinguere quindi ciò che è **complesso** (dal latino *cum + plexere* "intrecciato insieme") da ciò che è **complicato** (dal latino *cum + plicare* "piegato, arrotolato insieme"). In altri termini: un sistema complicato può essere decomposto in sottoparti e compreso analizzando ciascuna di esse, invece un sistema complesso può essere compreso solo considerandolo "nel suo insieme" e osservando in particolare le interazioni tra i suoi elementi.

I sistemi complessi possono essere definiti come sistemi dotati delle seguenti caratteristiche:

- Presenza di numerosi elementi
- Interazioni non-lineari
- Struttura *a rete*



- Retroazioni positive e negative
- Capacità di evolvere e adattarsi
- Robustezza
- Livelli di organizzazione

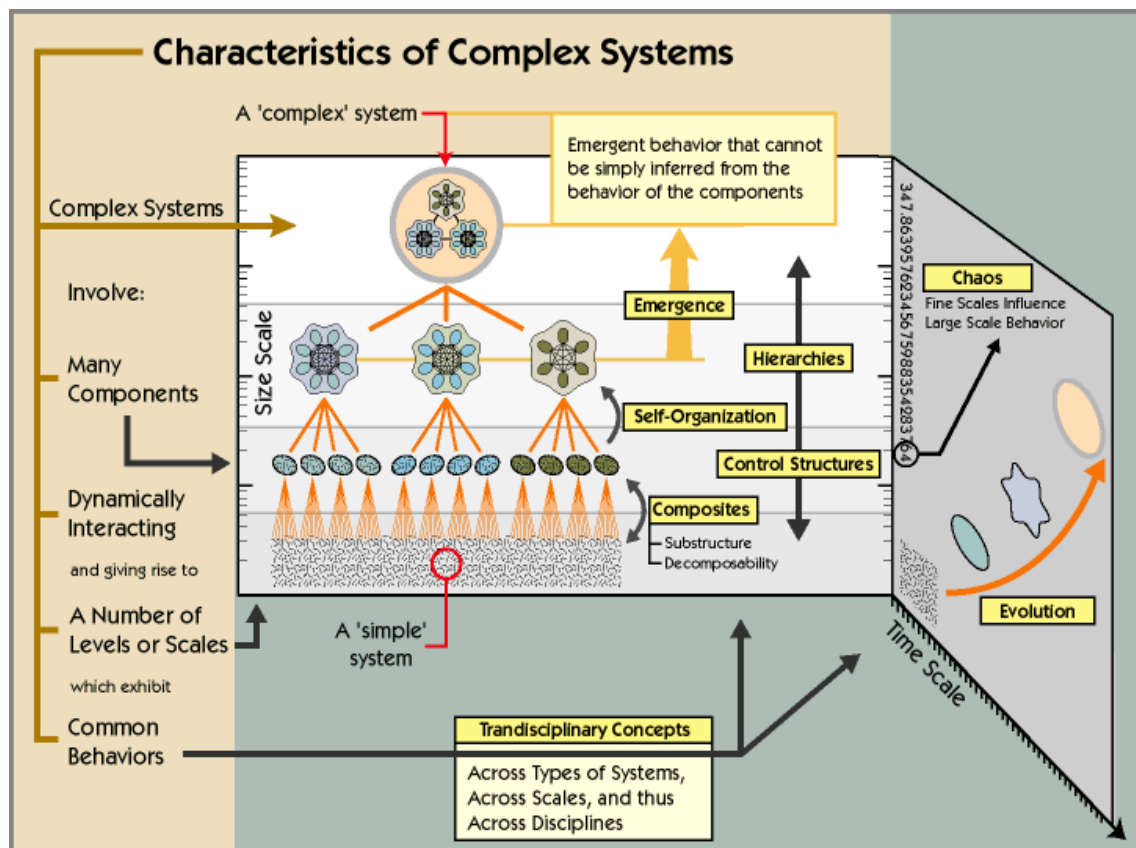


Figura 1-2. Principali caratteristiche dei sistemi complessi.

Diamo ora alcune definizioni relative ai sistemi complessi:

**Adattativo (*adaptive*):** un SC adattativo modifica il proprio comportamento in risposta all'ambiente.

**Complessità:** la lunghezza minima di una descrizione completa del sistema.

**Evoluzione:** processo di cambiamento e adattamento che avviene in popolazioni soggette a riproduzione e selezione di caratteristiche ereditabili.

**Retroazione (*feedback*):** processo circolare di azione e influenza in cui l'effetto agisce sulla causa che lo ha provocato.

Feedback negativo: l'effetto tende a ridurre l'entità della causa ovvero l'uscita è combinata con l'ingresso in modo tale da smorzare l'ingresso complessivo del sistema.

Feedback positivo: l'effetto aumenta l'entità della causa ovvero l'uscita è combinata con l'ingresso in modo tale da rinforzare l'ingresso complessivo del sistema.

**Auto-organizzazione (*self-organization*):** la comparsa di “regolarità” o *pattern* non imposti direttamente dall'esterno. Un comportamento organizzato emerge dalle interazioni locali tra gli elementi del sistema.

**Insieme:** collezione di entità, per esempio, un insieme di parole.

**Insieme strutturato:** collezione di entità aventi una struttura, relazioni, tra loro. Per esempio, un elenco di parole in ordine alfabetico.

**Sistema:** un insieme strutturato caratterizzato da proprietà specifiche che lo identificano e contraddistinguono come unità a sé, per esempio, le parole di una frase con significato.

**Astrazione:** processo di aggregazione di informazioni e dati e di sintesi di modelli concettuali che ne enucleano le proprietà rilevanti, escludendo i dettagli inessenziali per esempio una cartina geografica).

**Modello:** descrizione non ambigua e formale di un sistema. Il modello è frutto di un'astrazione, poiché si concentra sugli elementi essenziali per il contesto in cui il sistema è osservato.

Un sistema è caratterizzato da una dinamica *lineare* quando l'uscita è proporzionale all'ingresso. In questo caso l'uscita risultante di una somma di

ingressi è la somma delle uscite corrispondenti ai singoli ingressi (possiamo separare l'effetto di singoli ingressi). A meno di (forti) semplificazioni, nessun sistema è lineare. E' talvolta possibile *linearizzare* un sistema, in particolari condizioni e sotto opportune ipotesi (tipico nei settori ingegneristici del controllo e dei circuiti elettronici analogici). Comunemente, osserviamo sistemi **non-lineari**, nei quali non vale la relazione di proporzionalità, né di scomposizione degli ingressi. Tipicamente tali sistemi sono caratterizzati dalla presenza di retroazioni, positive e/o negative, la cui composizione è una forma naturale di incentivo e smorzamento. Ne deriva che i sistemi non-lineari sono in grado di realizzare compiti veramente complessi.

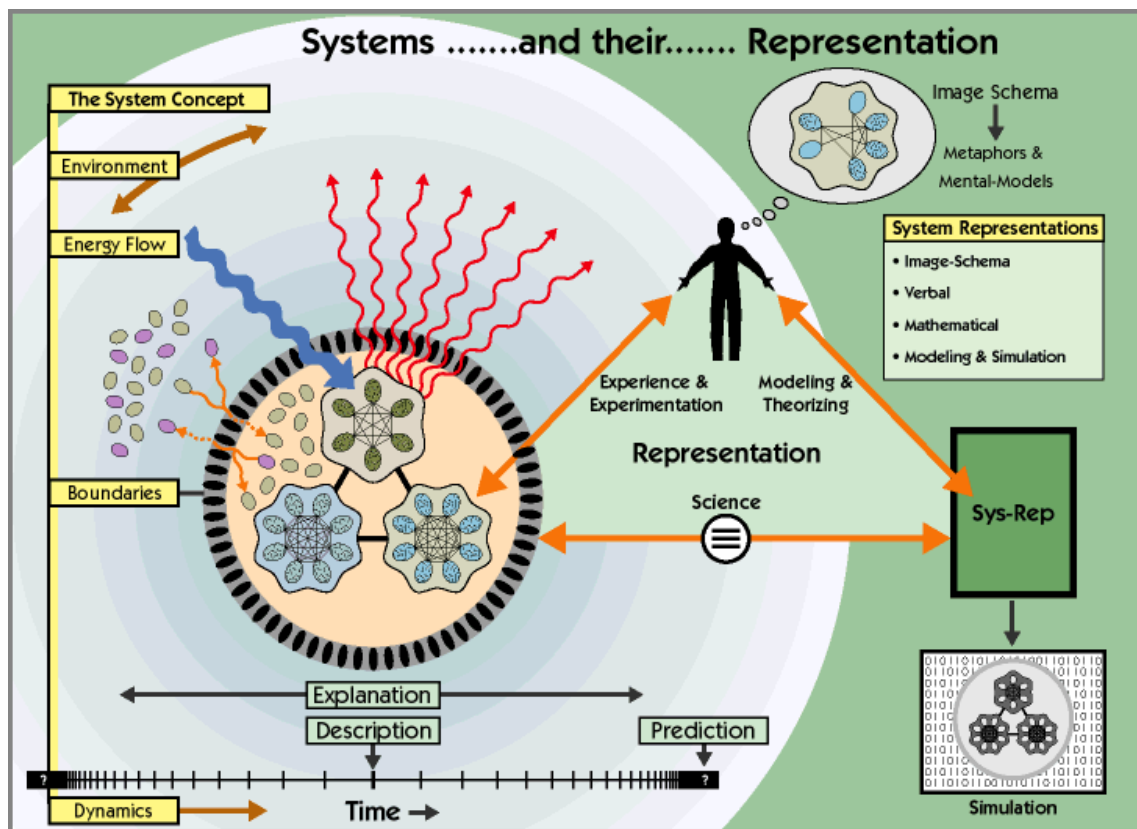


Figura 1-3. La rappresentazione dei sistemi complessi.

Un sistema dinamico, sia esso complesso o semplice, può essere descritto e analizzato all'istante di osservazione oppure in relazione alla sua evoluzione nel tempo. In tal caso si ha una predizione del comportamento del sistema stesso.

Inoltre il sistema può essere rappresentato, con livelli di astrazione decrescenti, attraverso uno schema/diagramma, una descrizione verbale, una descrizione matematica, un modello o una **simulazione**. La simulazione costituisce la più realistica forma di rappresentazione del sistema, con livello di astrazione più basso.

## 1.2. Tecniche per la modellazione di sistemi complessi

Se da una parte la dinamica microscopica delle particelle fisiche è complessa, dall'altra il comportamento a livello macroscopico di molti materiali è semplice, quasi statico. Prima di comprendere come i sistemi complessi possano avere comportamenti complessi, occorre capire perché il comportamento della materia può essere considerato come semplice. L'origine della semplicità è un processo di **media** tra le dinamiche delle particelle sulla scala dei tempi tipica delle osservazioni macroscopiche (teoria ergodica).

Un approccio che viene utilizzato per modellare la dinamica di sistemi distribuiti nello spazio e quello degli **automi cellulari**. Lo spazio e il tempo vengono discretizzati e le variabili semplificate in modo da poter assumere solo un numero finito di "stati". Gli automi cellulari forniscono una rappresentazione immediata (e, in un certo senso, "semplice") di sistemi la cui evoluzione globale dipende da leggi locali. Questo è il caso, ad esempio, del comportamento fisico dei gas perfetti, ma anche del movimento dei filamenti di DNA all'interno di una soluzione, dell'evoluzione di una popolazione sotto l'effetto di determinate leggi economiche e sociali, e così via. Un'altro metodo molto utilizzato, che prescinde dalla descrizione della dinamica del sistema, è il metodo **Monte Carlo**<sup>1</sup>. Inoltre, i

---

<sup>1</sup> Il metodo Monte Carlo è un procedimento matematico basato sull'utilizzazione di numeri casuali. Il nome allude alla capitale del Principato di Monaco e più precisamente al casinò, alle sale da gioco e alle roulette. Questo metodo consiste nel cercare la soluzione di un problema, rappresentandola quale parametro di una ipotetica popolazione e nello stimare tale parametro tramite l'esame di un campione della popolazione ottenuto mediante sequenze di numeri casuali.

metodi di minimizzazione costituiscono un altro importante aspetto legato alla simulazione di sistemi complessi. Uno tra i più conosciuti è il *simulated annealing*, metodo euristico che permette di trovare un minimo globale quando si è in presenza di più minimi locali.

Come descritto nel paragrafo 1.1, una delle caratteristiche principali tipica dei sistemi complessi è la capacità di adattarsi ed auto-organizzarsi. Uno degli strumenti più adatti a modellare questa proprietà è la **rete neurale artificiale**.

Una rete neurale artificiale (ANN "*Artificial Neural Network*"), normalmente è chiamata solo "rete neurale" (NN "*Neural Network*"), ed è un modello matematico/informatico di calcolo basato sulle reti neurali biologiche. Tale modello è costituito da un gruppo di interconnessioni di informazioni costituite da neuroni artificiali e processi che utilizzano un approccio di connessionismo di calcolo. Nella maggior parte dei casi una rete neurale artificiale è un sistema adattivo che cambia la sua struttura basata su informazioni esterne o interne e che scorre attraverso la rete durante la fase di apprendimento.

In termini pratici le reti neurali sono strutture non-lineari di dati statistici organizzate come strumenti di modellazione. Esse possono essere utilizzate per simulare relazioni complesse tra ingressi e uscite che altre funzioni analitiche non riescono a rappresentare.

Una rete neurale artificiale riceve segnali esterni su uno strato di nodi (unità di elaborazione) d'ingresso, ciascuno dei quali è collegato con numerosi nodi interni, organizzati in più livelli: ogni nodo elabora i segnali ricevuti e trasmette il risultato a nodi successivi.

Un metodo molto efficace per la modellazione di sistemi distribuiti, autonomi e adattativi è quello dei **sistemi multi-agente**. Un sistema multi-agente è un sistema composto da un certo numero di agenti che vivono all'interno di un ambiente virtuale nel quale interagiscono, cooperano, si coordinano, negoziano. Ogni singolo agente è un sistema software capace di prendere decisioni ed agire

autonomamente. Il *pattern* di funzionamento dell'intero sistema complesso emerge dalle interazioni tra gli agenti.

L'implementazione di un modello su un computer dà origine alla **simulazione** del sistema. Il concetto di simulazione ha registrato, nell'ultimo decennio, un significativo ampliamento del suo ambito di impiego, diffondendosi in molti settori diversi da quelli tradizionali. La simulazione è molto impiegata in ambito industriale sia come strumento di analisi, per studiare sistemi reali già esistenti, sia come strumento di progettazione, per studiare sistemi che ancora non esistono. Gli strumenti di simulazione permettono di analizzare il comportamento del sistema, studiarne l'evoluzione nel tempo e rispondere a paradigmi di tipo *if-then*. Inoltre lo strumento di simulazione risulta molto utile per l'analisi di quei sistemi complessi in cui l'uomo costituisce un sottosistema. Riproducendo il meccanismo di interazione tra l'uomo e gli altri sottosistemi è infatti possibile creare delle simulazioni *man-in-the-loop*<sup>2</sup>. Gli strumenti sviluppati per questo tipo di simulazione sono gli stessi che vengono utilizzati per l'addestramento dell'operatore umano all'utilizzo di determinati sistemi complessi (si pensi ad esempio ai simulatori di volo). L'interconnessione di più simulatori *man-in-the-loop* operanti su uno scenario comune dà luogo al concetto di **simulazione distribuita** che verrà approfondito nei capitoli successivi.

### 1.3. Gestione e controllo di sistemi complessi

Come visto nei paragrafi precedenti un sistema complesso può essere analizzato, modellato, controllato e gestito. Per quello che riguarda le ultime due azioni occorre fare una distinzione tra sistemi complessi che interagiscono con persone, macchine o con entrambe. La maggior parte dei sistemi, specialmente se molto complessi, appartiene all'ultima categoria, ovvero essi sono gestiti e controllati da

---

<sup>2</sup> Il termine *man-in-the-loop* si riferisce a simulazioni basate su modelli per il cui funzionamento è necessaria l'interazione con l'uomo

macchine e persone contemporaneamente attraverso meccanismi che saranno approfonditi nel paragrafo 1.4.

La gestione di un sistema complesso spesso si traduce nel controllo del processo di funzionamento di tale sistema. Questo tipo di controllo, tipico di settori industriali tecnologicamente avanzati e spesso critici per la sicurezza, prevede che il sistema di controllo (uomo, macchina o uomo + macchina) abbia le seguenti capacità/proprietà:

- identificazione (*detection*)
- percezione
- attenzione
- *deployment*
- diagnosi
- comunicazione
- memoria
- possibilità di prendere decisioni (*decision making*)
- selezione di azioni

Un parametro fondamentale per la classificazione di sistemi complessi, relativamente al loro controllo, è il tempo di risposta al controllo stesso. Pur appartenendo tutti alla categoria dei sistemi complessi, sistemi come un impianto di produzione di energia elettrica da fonte nucleare o il controllo del traffico aereo hanno tempi di risposta molto più lunghi rispetto ad un caccia militare. Di conseguenza alcune delle proprietà sopra elencate possono assumere una rilevanza maggiore come ad esempio: *decision making*, attenzione, percezione e memoria.

Esistono due funzioni principali del processo di controllo:

- il **controllo normale** e la **regolazione** del processo che, specialmente nei sistemi *safety-critical*, sono guidati da procedure standard e regolamenti;
- l'**osservazione**, la **diagnosi** e l'individuazione di **azioni correttive** per risolvere i rari malfunzionamenti che possono presentarsi.

Quando nel sistema di controllo è incluso un operatore umano, il livello di carico mentale di lavoro (*mental workload*) associato alla seconda condizione è ovviamente molto più alto rispetto ad una condizione operativa “normale”, di conseguenza non potrà essere sopportato per un periodo troppo lungo. D'altra parte uno dei rischi associati al controllo umano è la diminuzione di attenzione che può derivare da un fenomeno di “noia”, associato tipicamente ad una lunga permanenza nella condizione di normale controllo.

Un sistema di controllo efficace prevede quindi un corretto bilanciamento tra i periodi di *overloading* e quelli di *underloading* degli operatori umani coinvolti.

Il numero, la varietà e la complessità delle variabili in gioco fa sì che talvolta, nel controllo di alcuni sistemi complessi, si oltrepassino i limiti imposti dai processi cognitivi tipici del cervello umano. Per questa ragione ad un aumento di complessità dei sistemi è sempre associato un maggior impiego di automazione ed informatizzazione per il controllo di tali sistemi.

## 1.4. Automazione ed informatizzazione

Lo sviluppo industriale, tecnologico ed economico degli ultimi due decenni ha visto come protagonisti principali i concetti di automazione ed informatizzazione.

L'automazione, nel contesto attuale, può essere definita come:

- a) la meccanizzazione e l'integrazione di segnali provenienti da sensori artificiali che diano informazioni sullo stato delle variabili del sistema;
- b) l'elaborazione di tali dati al fine di compiere un'attività di *decision making*;
- c) l'attuazione meccanica (attraverso motori o strumenti per applicare forze al sistema) o l'attuazione di un processo informativo (attraverso la



comunicazione a terzi delle informazioni provenienti dalle attività precedenti).

L'informatizzazione dei dati, di qualsiasi natura essi siano, è un fenomeno, ancora più vasto, che pone le basi per l'automazione dei processi. Senza l'informatizzazione, infatti non sarebbe possibile compiere nessuna delle azioni sopra elencate.

Il punto b) costituisce l'area di maggior interesse per ciò che riguarda la trattazione di questa tesi. Lo studio delle tecniche per l'elaborazione delle informazioni, finalizzata al *decision making*, costituisce attualmente un'area di ricerca multidisciplinare in forte sviluppo.

Nel campo dell'aviazione, ad esempio, compaiono numerosi esempi di altissimi livelli di automazione, sia per ciò che riguarda i velivoli, sia nel controllo del traffico aereo. Nel caso dei velivoli commerciali, infatti, abbiamo assistito ad un crescente livello di automazione. Il fenomeno è cresciuto enormemente a partire dagli anni '70 con l'introduzione del *glass cockpit* in cui le informazioni provenienti dalle centinaia di sensori del velivolo venivano fuse in un'unica rappresentazione. Più recentemente l'introduzione di sistemi come TCAS (*Traffic alert and Collision Avoidance System*), GPS (*Global Positioning System*) e i moderni FMS (*Flight Management System*) ha dimostrato come l'impiego di alti livelli di automazione si possa tradurre in efficacia e progresso del sistema. Lo stesso tipo di evoluzione, seppur più lentamente, sta avvenendo negli altri settori del trasporto (marittimo, ferroviario, automobilistico), nella maggior parte dei settori *safety-critical* (impianti nucleari, emergenze..) ed anche in settori più comuni come l'ufficio o l'abitazione (domotica).

Una possibile classificazione dei livelli di automazione in relazione al tipo di controllo effettuato è quella di Sheridan [Sheridan 2002][Crystal 2004] dove esistono 6 livelli di automazione dei sistemi che corrispondono ad altrettanti livelli di controllo da parte dell'operatore.

Il primo livello è il controllo **diretto** da parte dell'operatore umano di un sistema o di un processo complesso (come ad esempio un intervento chirurgico classico); in questo caso il livello di automazione è nullo anche se, riferendosi proprio all'esempio citato, in ambito chirurgico si sta assistendo ad un forte impulso verso sistemi automatizzati<sup>3</sup>.

I sistemi in cui tra l'uomo e il processo si interpongono *displays* e *controls*, che sono rispettivamente dispositivi di visualizzazione delle informazioni provenienti da parte del sistema e dispositivi che permettono l'interazione con il sistema, sono i sistemi a controllo **indiretto** (livello II). Questo tipo di controllo è tipico di sistemi poco automatizzati in cui però la necessità di visualizzare informazioni del sistema e l'impossibilità di agire direttamente sugli attuatori per il controllo (perché troppo numerosi e magari situati in luoghi poco accessibili) porta all'adozione di mezzi tra l'uomo e il sistema. Tali mezzi costituiscono la forma più semplice di **interfaccia uomo – macchina**. Spesso le informazioni provenienti dai sensori sono incomprensibili da parte dell'operatore così come talvolta i comandi imposti dall'operatore sono in un linguaggio estraneo al sistema che deve essere controllato. Per superare questo ostacolo è necessario interporre tra il sistema e i dispositivi di *display* e *control* dei calcolatori in grado di processare algoritmi di traduzione, interpretazione e fusione di dati. Il controllo **assistito al computer** (livello III) è tipico di molti sistemi complessi come ad esempio le centrali per la produzione di energia elettrica da fonte nucleare.

Quando il computer che si interpone tra il sistema ed i dispositivi *display* e *control* acquista una maggior autonomia e, almeno per piccoli periodi, prende il controllo del processo, si può parlare di controllo di supervisione o **supervisory control**. Il termine deriva dalla forte analogia tra il modo di interagire di un supervisore con i propri subordinati, tipico delle organizzazioni sociali, e il modo di interagire tra un operatore e sistemi automatizzati ed intelligenti. In un contesto sociale infatti il supervisore dà delle direttive che vengono comprese e

---

<sup>3</sup> Un esempio di sistema automatizzato per la chirurgia è *da Vinci<sup>®</sup> Surgical System* che si avvale di un sistema di visione 3D stereoscopica collegato a bracci robotici.

tradotte in azioni di dettaglio da parte delle persone subordinate. D'altra parte i subordinati collezionano informazioni dettagliate sui risultati ottenuti e le presentano riassunte al supervisore il quale deduce lo stato del sistema e prende decisioni sul da farsi. Il grado di intelligenza/efficienza dei subordinati determina il coinvolgimento e la necessità di intervento da parte del supervisore. Lo stesso tipo di interazione avviene tra l'operatore umano e l'automazione, che spesso si configura come un subordinato di limitata intelligenza. Precisamente, *supervisory control* significa che uno o più operatori talvolta programmano e continuamente ricevono informazioni da un computer che completa autonomamente al suo interno un ciclo di controllo, utilizzando i sensori artificiali e gli attuatori presenti sul sistema controllato. Nella realtà operativa questo ciclo chiuso viene utilizzato sporadicamente, quindi il computer compie un controllo autonomo solamente su alcune variabili e per periodi limitati. L'allocazione, sia in termini temporali che in termini di variabili controllate, dell'autonomia al computer dipende sia da ciò che l'operatore sceglie sia dalla capacità decisionale che è concessa al computer.

Nello stretto significato del termine il *supervisory control* prevede che l'operatore umano programmi il computer specificando obiettivi, possibili compromessi, vincoli fisici, modelli, pianificazioni e regole *if-then-else*. Questo tipo di input sono generalmente forniti in un linguaggio di alto livello, più vicino al linguaggio umano che a quello macchina. Quindi il *supervisor* passa il controllo al computer che esegue i programmi stabiliti, integrando autonomamente nuove informazioni provenienti dai sensori ed agendo sul sistema. L'operatore umano può mantenere questa condizione di supervisore per un'intera operazione, da un certo istante temporale ad un altro o può decidere di modificare repentinamente il tipo di controllo verso un controllo diretto (in questo caso si parla di *trading control*).

Talvolta può accadere che alcune variabili del sistema siano controllate direttamente dall'operatore e contemporaneamente altre variabili siano sotto il controllo del computer, questo è il caso del cosiddetto *shared control*. Un tipico esempio di *supervisory control* è rappresentato da un moderno velivolo

commerciale in condizione di crociera sotto controllo del FMS e in particolare dell'autopilota.

In alcuni sistemi accade che vi sia una separazione fisica tra l'operatore umano ed il sistema o processo controllato: in questo caso si parla di **remote supervisory control** (livello 5). Come si può osservare in figura 1-4, abbiamo la presenza di due computer, il computer che interagisce con l'operatore umano (*human-interactive computer*) ed il computer che interagisce con il sistema (*task-interactive computer*) messi in connessione da un canale di comunicazione. Questo è lo schema attraverso cui si può interpretare il sistema UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*) dove l'insieme di *displays*, *controls* e *human interactive computer* costituisce la *Ground Control Station*; *task interactive computer* e *controlled process* corrispondono al velivolo; il canale di comunicazione è il cosiddetto *data-link*.

Quando i sistemi da controllare diventano più di uno si parla di **remote multi-task supervisory control**, dove abbiamo un *task interactive computer* per ciascun processo o sistema controllato. Questo tipo di controllo, che corrisponde al più alto livello di automazione nella classificazione di Sheridan, è tipico delle flotte di UAV in cui però il livello di automazione/autonomia degli  $n$  UAV costituenti la flotta non è uguale per tutti. Talvolta compare un UAV che comanda la missione, controllato attraverso un *task interactive computer* su cui è implementato un alto livello di autonomia, seguito dagli altri UAV costituenti la flotta, che sono subordinati all'UAV comandante.

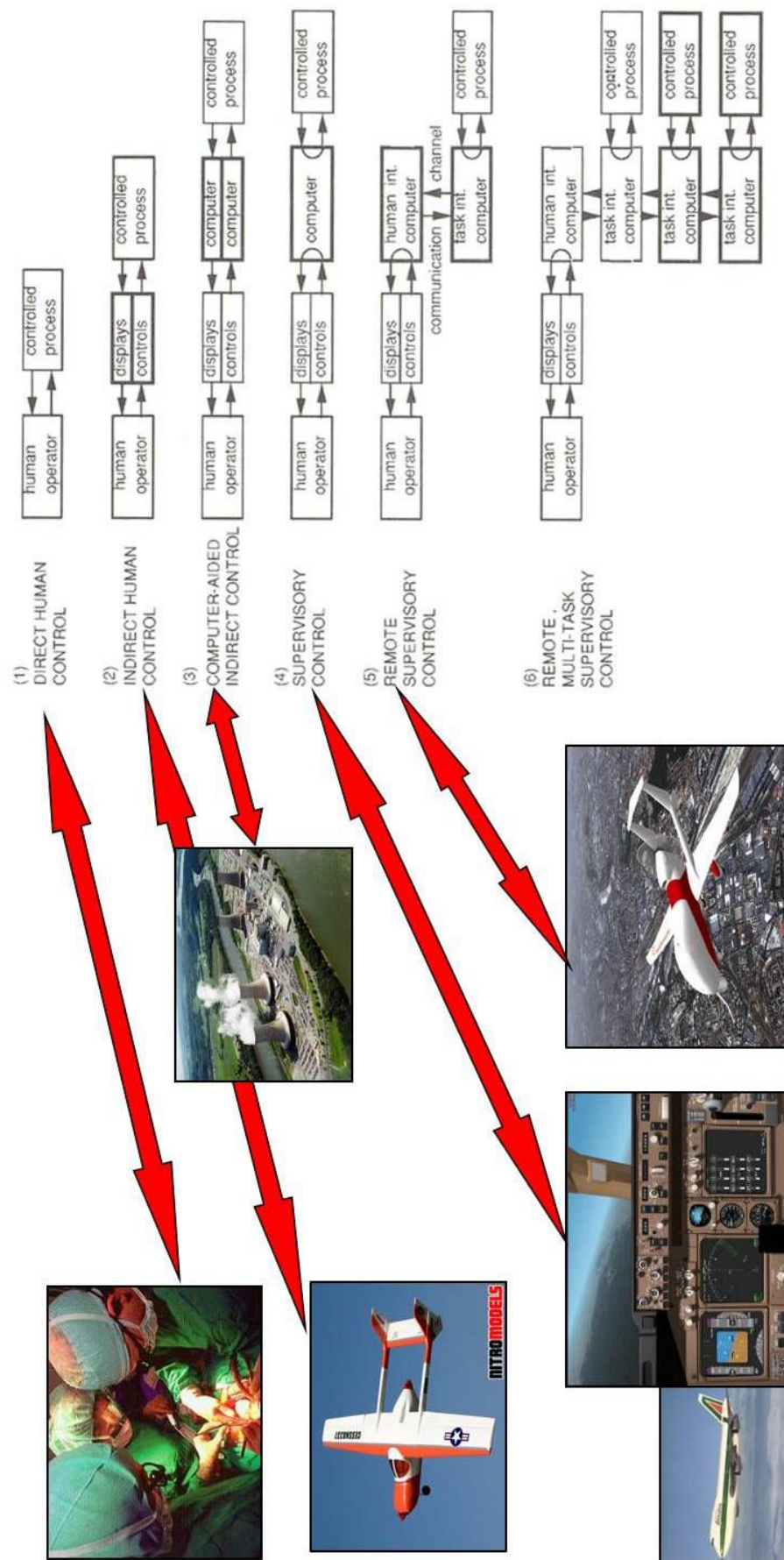


Figura 1-4. I sei livelli di automazione di Sheridan con alcuni esempi.

## 1.5. La necessità di interfaccia uomo-macchina

E' evidente come, a partire dal II livello di Sheridan, vi sia la necessità di un “mezzo” che permetta all'uomo di dialogare con il sistema controllato. La complessità e l'importanza di questo mezzo cresce esponenzialmente all'aumentare del livello di automazione del sistema. Se nel livello II (*indirect human control*) l'unico mezzo è rappresentato da dispositivi di display e control, al livello VI (*remote multi-task supervisory control*) avremo un complesso *human interactive computer*, capace di dialogare da una parte con le periferiche di visualizzazione e controllo e dall'altra con un certo numero di *task interactive computer* aventi un elevato gradi di autonomia. Non è quindi possibile progettare sistemi fortemente automatizzati senza porre grande attenzione ai mezzi tra l'uomo e tali sistemi. Tali mezzi appartengono alla categoria delle cosiddette **interfaccia uomo-macchina**, il cui studio, classificazione e progettazione sarà trattato nel II capitolo.

# Capitolo 2

## Interfaccia Uomo-Macchina e Interfaccia Uomo-Computer: Trend di Sviluppo

### 2.1. Definizioni

L'interazione tra computer ed utente può essere considerata una vera e propria disciplina che comprende lo studio, la progettazione e la valutazione delle modalità con cui una persona interagisce con il computer e che prende il nome di *Human Computer Interaction*. Questa disciplina, se osservata da una prospettiva più ampia, ne coinvolge altre: informatica, psicologia, sociologia ed ergonomia che concorrono, sotto diversi aspetti, ad ottenere risultati vincenti in termini di comunicabilità e facilità d'uso di uno strumento informatico. Lo sviluppo di interfacce uomo-computer (*Human Computer Interface* HCI) è la parte più critica nel processo di sviluppo di strumenti informatici e per questo motivo è stata oggetto di moltissimi studi negli ultimi decenni. Alcune note *software-house*

hanno fatto della realizzazione di HCI la ragione principale di successo ed affermazione nel proprio settore di mercato.

Il computer, come mezzo cognitivo, è diventato negli anni uno strumento utilizzato da una vasta gamma di utenti per i fini più svariati.

I primi computer, comparsi negli anni cinquanta, erano ingombranti, costosi e potevano essere utilizzati solo da tecnici molto specializzati, i quali erano gli unici capaci di gestire i linguaggi per poter comunicare con tali sistemi. Da allora, molte cose sono cambiate. In primo luogo la miniaturizzazione e la diffusione dei componenti elettronici ha permesso di avere computer maneggevoli a costi ragionevoli. In secondo luogo gli sforzi sostenuti per ridurre il *gap* tra i processi di pensiero ed apprendimento umano e il modo di “ragionare” del computer hanno permesso un abbattimento dei tempi di apprendimento e la conseguente diffusione capillare degli strumenti informatici.

Facendo riferimento al capitolo precedente si evidenzia la differenza tra **interfaccia uomo-macchina** (*Human-Machine Interface* HMI) ed **interfaccia uomo-computer**.

L’interfaccia uomo-macchina infatti è, nei tipi di controllo da II a VI, il “mezzo”, tra l’operatore ed il sistema o processo controllato, che comprende:

- *displays*
- *controls*
- *human interactive computer*
- *task interactive computer* (talvolta)

In un certo senso, il computer fa parte esso stesso della HMI. Ad una prima analisi potrebbe sembrare che il “lato operatore” dell’interfaccia coincida per le HMI e per le HCI. Questo non è del tutto vero in quanto l’interfaccia uomo-macchina fornisce all’operatore, oltre alle funzionalità tipiche dell’interfaccia uomo-computer, *displays* e *controls*, anche una forma di supporto alle decisioni (*decision aids*) tipica delle HMI.



Tuttavia la maggior parte dei principi di progettazione e dei risultati ottenuti in decenni di studi sulle HCI sono utilizzabili nella progettazione di HMI.

## 2.2. Principi fondamentali per la progettazione di HMI

Come già anticipato nel paragrafo precedente, la *Human Computer Interaction* è un settore di studio multi-disciplinare i cui concetti di base possono appartenere alla psicologia cognitiva, alla sociologia ed all'ergonomia.

Donald Norman, padre della psicologia cognitiva nell'usabilità di prodotto, individua due concetti chiave nella progettazione di oggetti di uso comune: *visibility* e *affordance*. Con il primo concetto egli intende la possibilità da parte dell'utente di controllare visivamente tutta la mappa dell'interazione, individuando le parti con cui si interagisce (bottoni, leve, sistemi di comando) che possono produrre un feed-back e che permettono di comprendere la loro funzione nel processo di interazione. Il secondo concetto di *affordance* si riferisce alle proprietà intrinseche degli oggetti che devono suggerire all'utente l'utilizzo dell'oggetto stesso.

Un altro principio fondamentale per l'usabilità di un'interfaccia è la **consistenza**. Con questo termine ci si riferisce al fatto che la sintassi (linguaggio, campi di input, colori, ecc..) e la semantica (comportamento associati agli oggetti) del dialogo devono essere uniformi e coerenti. La consistenza permette all'utente di trasferire agevolmente la conoscenze da un'applicazione all'altra, aumenta la predicibilità delle azioni e del comportamento dell'interfaccia e favorisce l'apprendimento nel suo impiego.

Gli attributi fondamentali di un sistema consistente sono:

- prevedibilità: caratteristica per cui l'utente ritiene di poter prevedere l'effetto delle sue azioni basandosi sull'esperienza maturata durante le interazioni passate;

- familiarità: proprietà che misura la correlazione tra la conoscenza già posseduta dall'utente e quella necessaria per l'effettiva interazione
- generalizzabilità: proprietà per cui l'utente può estendere la conoscenza maturata in una specifica interazione ad altre situazioni simili.

Un'interfaccia usabile, inoltre, deve avere un buon **mapping naturale** ovvero una efficace relazione tra, ad esempio, l'azionamento di un tasto ed i suoi effetti. Un buon *mapping* sfrutta i modelli culturali appresi o le analogie spaziali. Le modalità di azionamento dei comandi devono essere progettate in analogia al tipo di risultati che questi producono, ad esempio innalzare un cursore genera la naturale aspettativa di incrementare la quantità della variabile comandata attraverso quel cursore. In alcuni casi il *mapping* deriva anche da uno standard culturale, ovvero la corrispondenza tra azionamento di un comando ed effetto prodotto viene percepita come naturale dalla maggior parte dei soggetti di una data popolazione.

Affinché l'utente possa comprendere gli effetti dei propri comandi è necessario che l'interfaccia abbia delle buone caratteristiche per ciò che riguarda il **feed-back**. Questo principio regola il rapporto uomo-computer o uomo-macchina, infatti, grazie all'informazione di ritorno l'operatore può sapere se e come il suo comando è stato recepito, potendo quindi stabilire il successivo passo da compiere.

In un'interfaccia ben progettata, il **linguaggio** utilizzato a livello di interfaccia è semplice e familiare per l'utente e rispecchia i concetti e la terminologia a lui noti.

La terminologia, gli elementi iconici e quelli grafici devono tenere conto delle esigenze fisiche e psicologiche dell'utente e devono ispirarsi alle convenzioni dell'ambiente culturale a cui egli fa riferimento. Le forme per rappresentare concetti in forma grafica e simbolica, se ben realizzate, possono agevolare la comprensione in modo più efficace e diretto rispetto alle parole. La definizione di un linguaggio adeguato e significativo per l'utente, specialmente se simbolico, è un compito assai complesso poiché prevede una conoscenza molto approfondita del mondo degli utilizzatori.

Ogni azione dell'utente deve essere concepita come un tentativo verso la giusta direzione. Tuttavia è possibile, e anche probabile, che vengano commessi degli **errori** che non sono altro che azioni specificate in modo incompleto o inesatto. Si tratta di una componente naturale del dialogo utente-interfaccia che deve essere tollerata, garantendo la giusta flessibilità di utilizzo anche in situazioni critiche.

Ci sono alcuni errori difficili da eliminare o ridurre come le “sviste”: inconsapevolmente, viene eseguita un'azione diversa rispetto a quella proposta nelle intenzioni a causa di una distrazione o interruzione.

Altri tipi di errore, invece, si possono prevenire con una buona progettazione dell'interfaccia: sono gli errori commessi a seguito di un'errata applicazione di alcune regole di interazione o per la mancanza di sufficienti ed adeguate informazioni o conoscenze. Rientrano tra questi tipi di errore quelli dovuti ad un modello di dialogo che l'utente non comprende o che non incontra le sue aspettative. In un'interfaccia efficace e funzionale gli errori di questo tipo vengono prevenuti ed eventualmente corretti.

Un **modello di interazione** attraverso il quale è possibile comprendere molti esempi di interazione uomo-macchina e uomo-computer è quello di Hutchins, Hollan e Norman il cui schema è rappresentato in figura 2-1.

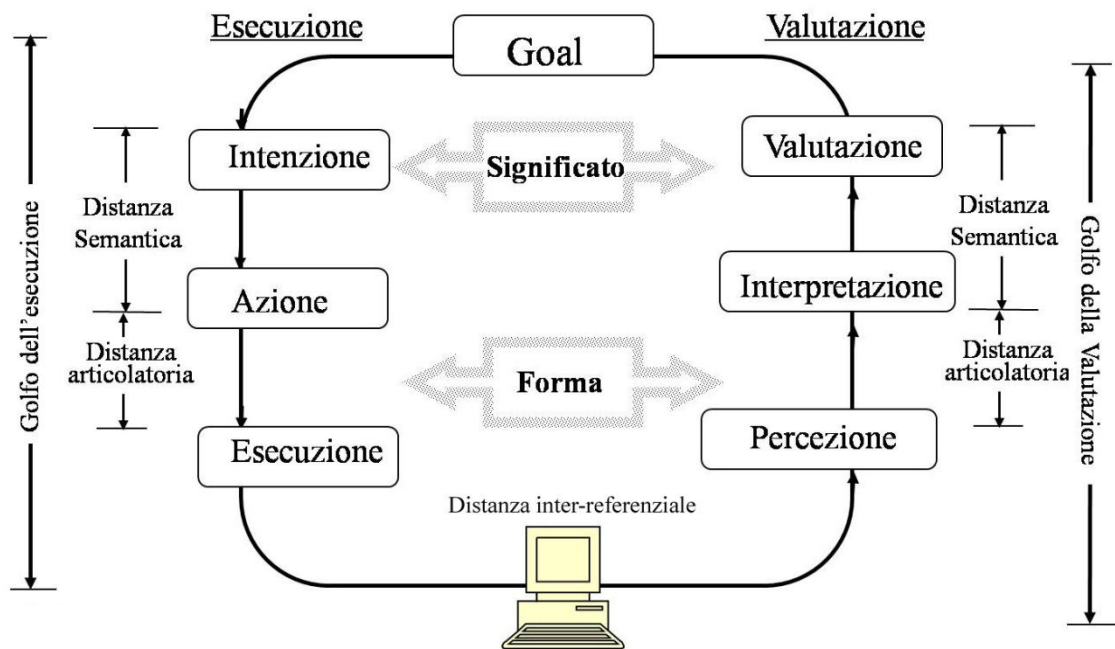


Figura 2-1. Modello di interazione secondo Hutchins, Hollan e Norman.

Le fasi del modello sono sette, una per gli obiettivi, tre per l'esecuzione e tre per la valutazione:

- Formazione dell'obiettivo
- Formazione dell'intenzione
- Specificazione dell'intenzione
- Esecuzione dell'azione
- Percezione dello stato del mondo
- Interpretazione dello stato del mondo
- Valutazione del risultato

Le distanze sono invece tre, due delle quali sono presenti sia sul lato dell'esecuzione sia sul lato della valutazione: la distanza semantica e la distanza referenziale. La terza distanza si riferisce al passaggio dall'esecuzione alla valutazione dell'azione. Sia le fasi che le distanze non devono essere considerate come entità discrete dai contorni ben separati ma piuttosto come momenti più o

meno presenti in tutte le attività. Di fatto, molti comportamenti non richiedono il coinvolgimento di tutte le fasi e molte attività non sono eseguite con azioni singole. Il modello ha lo scopo principale di definire le potenziali unità di analisi attraverso le quali è possibile rappresentare il comportamento umano nell'uso di strumenti ed ha il merito di essere una guida efficace nell'analisi delle difficoltà d'uso di strumenti, e di fornire un *framework* entro il quale collocare molte delle conoscenze derivanti dalla psicologia cognitiva.

Per esemplificare il modello proviamo a fornire un esempio di attività che può essere descritta attraverso il suo utilizzo.

Immaginiamo di lavorare al computer, di usare un programma di scrittura e di aver più file aperti. Immaginiamo inoltre di usare una interfaccia grafica a manipolazione diretta (ad es. le interfacce che fanno uso di icone, finestre, sistemi di puntamento, etc.). Sto lavorando sul file A ma decido che ho bisogno di alcune informazioni che sono sul file B (questo è l'obiettivo: avere una parte delle informazioni presenti nel file B attivo in prima schermata sul computer). L'obiettivo deve quindi essere tradotto nelle intenzioni che definiscono le azioni appropriate nel mondo: prendere il mouse, muovere il puntatore sopra il comando finestra nella barra di menu, cliccare, selezionare il nome del file desiderato, rilasciare il bottone del mouse, osservare in che punto è evidenziato il testo del file B nella finestra, ecc. Devo anche specificare come muovere la mano, come impugnare propriamente il mouse e come spingere il suo bottone controllando il puntatore sullo schermo. L'obiettivo deve quindi essere tradotto in specifiche intenzioni, che a loro volta devono essere tradotte in specifiche sequenze di azioni, azioni che controllano gli apparati percettivo-motori. E' da notare inoltre, che posso soddisfare l'obiettivo attraverso altre sequenze di azioni e altre intenzioni. Se per esempio muovendo il puntatore verso la barra di menu mi accorgo che sul retro della finestra attiva è parzialmente evidente la finestra relativa al file B, posso portare il puntatore su quell'area dello schermo e cliccare in modo da rendere tale finestra attiva in primo piano. L'obiettivo non è cambiato, ma parte della sequenza di azioni e delle relative intenzioni lo sono.

L'attività appena descritta sarebbe profondamente diversa se io stessi lavorando non con un'interfaccia grafica a manipolazione diretta bensì con un sistema che usa una interfaccia a linea di comando (es. VI per UNIX o WordStar per DOS 3.3). L'obiettivo potrebbe rimanere immutato ma le intenzioni, le azioni, l'interpretazione degli eventi e la valutazione dei risultati sarebbero radicalmente diverse.

Le distanze tra le varie fasi del modello dell'azione si riferiscono proprio al modo con cui si realizza più o meno prontamente il passaggio da una fase ad un'altra.

Più specificamente la distanza semantica, per ciò che concerne l'azione, riguarda la relazione fra le intenzioni dell'utente ed il significato dei comandi che è possibile eseguire sull'interfaccia. In altre parole, tale distanza è in funzione della facilità con cui l'interfaccia fornisce mezzi e strumenti per esprimere le intenzioni dell'utente.

Intenzioni, si noti bene, pertinenti al dominio di applicazione dell'attività (ad esempio, mantenere costante la pressione in una valvola, modulare il livello di luminosità di una sala, sovrapporre ad un grafico un testo con differenti orientamenti, etc.) Sul lato della valutazione, la distanza semantica si riferisce all'elaborazione che è richiesta all'utente per determinare se le condizioni di soddisfacimento delle proprie intenzioni sono state realizzate. Se i termini dell'output non sono quelli definiti nell'intenzione dell'utente, all'utente viene di fatto richiesto di tradurre l'output in termini che siano compatibili con l'intenzione, al fine di valutare i risultati della sua azione.

Per esemplificare quanto detto, si consideri il caso del testo scritto su un grafico. Se l'aver compiuto l'azione di scrivere non fornisce immediatamente informazioni sul suo esito (posizione del testo in relazione al grafico), ma richiede passi successivi per ottenere la rappresentazione di tale informazione, allora la distanza cresce proporzionalmente alle informazioni che devono essere gestite per anticipare l'esito o per produrlo materialmente. Il sistema operativo DOS e molte delle sue applicazioni, ad esempio, sono caratterizzate da elevate distanze

semantiche sia sul lato dell'esecuzione sia sul lato della valutazione. Questo comporta che l'intenzione di avere, per esempio, un testo sottolineato venga tradotta in una serie articolata di comandi dalla sintassi rigida, che devono essere recuperati dalla memoria a lungo termine ed eseguiti. Il risultato poi può essere valutato solo operando ulteriori trasformazioni mentali sugli effetti realmente prodotti o eseguendo la serie di operazioni necessaria per ottenere il risultato finale (il testo stampato) e solo allora valutarne il risultato.

La distanza di riferimento intercorre fra il significato di una espressione e la sua forma fisica, sul lato dell'esecuzione e su quello della valutazione. Le interfacce a linea di comando, ad esempio, hanno solitamente una distanza di riferimento elevata a causa della relazione arbitraria tra la forma di una espressione ed il suo significato. Per esempio, se vogliamo duplicare con un solo comando un certo numero di file da un disco ad un altro usando una interfaccia di tipo DOS è necessario attribuire ai file di interesse un nome composto con una appendice comune, e poi eseguire (digitare) il comando di copia. Con una interfaccia grafica a manipolazione diretta tipo Microsoft Windows o Apple Macintosh le azioni ed il loro significato in relazione al compito sono un tutt'uno: si selezionano con il mouse i file di interesse e si trasporta la loro immagine direttamente sul nuovo disco. L'azione si identifica direttamente con l'intenzione ed è di fatto ciò a cui si riferisce (da cui il nome distanza di riferimento, cioè la forma delle azioni coincide o si sovrappone con la definizione operativa dell'intenzione).

Vi è infine la distanza inter-referenziale, che riguarda la relazione fra le forme di input e quelle di output presenti nel corso dell'interazione uomo-computer. Questa distanza è massima quando le due forme sono completamente distinte. Si pensi ad esempio al caso di una tastiera con tasti rigidi (dove non ci sia feedback in corrispondenza dell'azione di premere) e ad un video che presenta solo una lettera per volta. Nella misura in cui l'output del sistema può essere liberamente usato come input o perlomeno come una sua componente, tale distanza è ridotta. Nelle interfacce grafiche un'icona, ad esempio, rappresenta un output del sistema, ma è nello stesso tempo oggetto di possibili azioni dell'utente, ed i risultati di

queste azioni costituiscono a loro volta nuovi input per il sistema. Nelle interfacce tipo DOS l'input e l'output non solo sono operativamente differenti, ma spesso hanno un lessico differente (gli stessi termini hanno significati differenti se sono usati come input o come output).

## 2.3. L'approccio “*user centered*”

Dagli anni Ottanta in poi, nello sviluppo di modelli di progettazione basati sull'usabilità, l'utente è stato progressivamente posto sempre più al centro del processo elaborando quello che oggi è definito come “*user centered design*”.

Questa metodologia di progettazione, individua una direzione invertita rispetto a quella adottata dagli approcci ingegneristici, coinvolgendo gli utenti sin dalle prime fasi del processo di progettazione. La progettazione orientata all'utente è intesa come un approccio metodologico che, garantendo un elevato grado di corrispondenza tra prodotti ed esigenze degli utenti, permette di raggiungere la realizzazione di sistemi/interfacce/prodotti facili da apprendere ed usare.

Lo standard ISO 13407, che identifica i requisiti di base per la “certificazione” dei processi di produzione del software centrato sull'utente, definisce la progettazione *user-centered* come “un approccio allo sviluppo di sistemi interattivi focalizzato specificatamente sul rendere il sistema usabile. E' una attività multidisciplinare, che richiede competenze e tecniche specifiche di ergonomia. L'applicazione di tali metodi e tecniche al disegno di sistemi interattivi ne aumenta l'efficacia e l'efficienza, migliora le condizioni di lavoro, contrasta possibili effetti nocivi sulla salute dei lavoratori, sulla sicurezza e sulle prestazioni. Applicare l'ergonomia al disegno di sistemi richiede di considerare fattori primari le capacità, competenze, conoscenze, limitazioni ed esigenze degli utenti.”

In realtà, ad un'analisi più approfondita, la metodologia *user-centered* risulta essere un processo iterativo che coinvolge in tutte le sue fasi, attraverso varie tecniche, gruppi di utenti. Le fasi principali sono:



- definizione dei requisiti
- progettazione
- sviluppo – prototipazione
- valutazione

Come si può osservare in figura 2-2 il processo iterativo interessa solamente le ultime tre fasi e l'utente è coinvolto nelle fasi di definizione di requisiti e valutazione che verranno descritte nei paragrafi successivi.



Figura 2-2. Le fasi del processo di progettazione con metodologia *user-centred*.

### 2.3.1. Definizione dei requisiti

La definizione dei requisiti è la fase più critica della metodologia *user centered*. Esistono numerose tecniche utili a definire i requisiti che devono essere soddisfatti da un sistema; la scelta deve essere fatta sulla base del tempo a disposizione per portare a termine il progetto, delle competenze e conoscenze di coloro che si occuperanno di collezionare, classificare ed analizzare i dati e, infine, dalla possibilità di interpellare gli utenti. Di seguito verranno brevemente descritte le principali tecniche.

**User Survey:** metodo che necessita il coinvolgimento di un grande numero di utenti a cui viene inviato un questionario mirato alla comprensione delle necessità o aspettative per un determinato prodotto; l'analisi dei dati viene fatta mediante metodi statistici.

**Interview:** questa tecnica prevede di avere sempre una relazione biunivoca tra il numero di intervistatori ed il numero di utenti intervistati, di conseguenza è molto dispendioso in termini di tempo, avendo però come vantaggio il fatto di poter catturare, attraverso il dialogo, una maggiore varietà di informazioni.

**Contextual inquiry:** le interviste vengono contestualizzate poiché vengono svolte all'interno dell'ambiente operativo dell'utente, creando una sorta di rapporto docente-discente tra l'utente e l'intervistatore.

**User observation:** l'osservazione passiva della pratica operativa dell'utente. Può essere svolta con presenza dell'osservatore in loco oppure attraverso registrazione video. Nella messa in pratica di questa tecnica è molto importante che l'osservatore non interferisca in alcun modo con gli utenti.

**Focus group:** riunione informale tra piccoli gruppi di utenti (6-12 persone) alla presenza di un moderatore che è responsabile di mantenere la discussione focalizzata sull'obiettivo preposto. In genere non si ottiene un parere unanime, ma si tenta di evidenziare il più possibile le differenze di opinione.

**Task analysis:** è la tecnica più importante soprattutto nella progettazione di interfaccia per il controllo di sistemi complessi. Attraverso una *task analysis* è possibile analizzare che cosa l'utente fa in termini di azioni e/o processi cognitivi per svolgere un compito (*task*). Inoltre questa tecnica permette di identificare i flussi di informazioni all'interno di un processo/sistema e anche l'eventuale ri-allocazione dei *task* all'interno di sistemi di nuova concezione. E' la tecnica più onerosa in termini di tempo ma anche quella che fornisce risultati migliori.

Innanzitutto vi è una scomposizione di macro-compiti (*high level tasks*) in operazioni più semplici che viene ottenuta attraverso domande mirate del tipo “come viene svolto questo compito?”. I risultati ottenuti vengono organizzati graficamente e vengono indicati i flussi di informazioni necessarie allo svolgimento dei *sub-task* individuati.

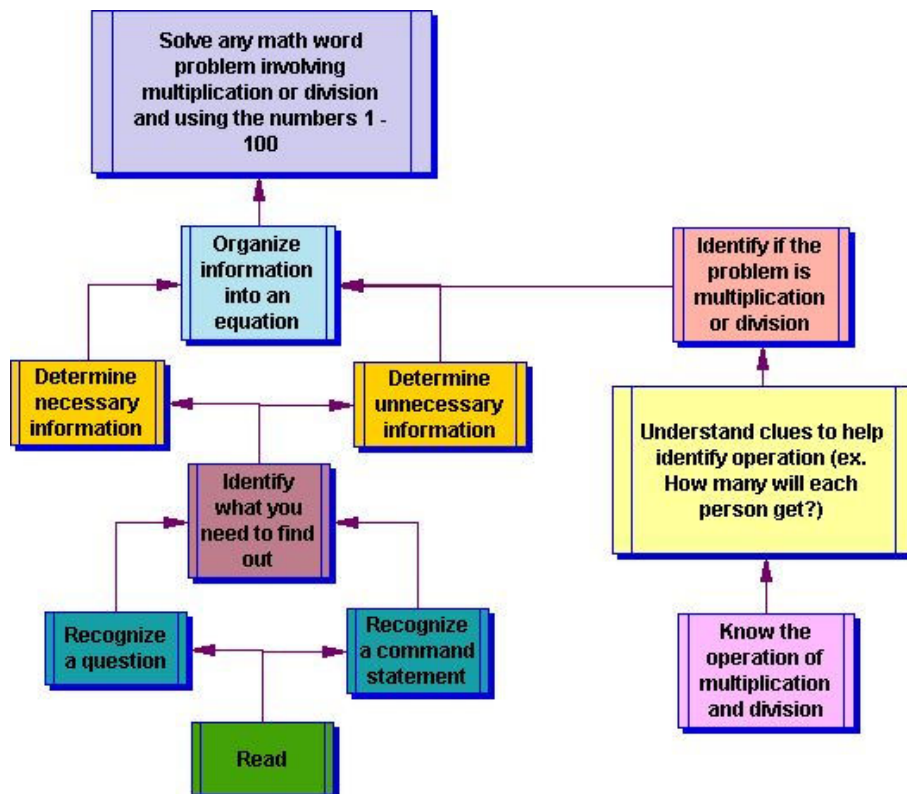


Figura 2-3. Esempio di scomposizione di un task in sub-task.

Il processo di scomposizione può essere ripetuto quante volte lo si ritenga necessario al fine di ottenere il livello di dettaglio desiderato.

Alla fine della *task analysis* è opportuno presentare i risultati ad un utente, che sia estraneo al processo che è stato compiuto, al fine di verificarne la coerenza.

## 2.3.2. Valutazione

La fase di valutazione rappresenta il controllo del processo di progettazione *user centered*. Affinché essa possa essere efficace occorre realizzare un prototipo del prodotto che adotti le soluzioni innovative proposte ma che, al tempo stesso, sia il più simile possibile al prodotto finale (industrializzato).

Vengono descritte in questo paragrafo le principali tecniche di valutazione.

**Diagnostic evaluation:** uno scenario, che prevede lo svolgimento di alcuni *task*, viene proposto ad un piccolo gruppo di utenti che devono, senza alcun tipo di aiuto, portare a termine le azioni previste talvolta utilizzando la tecnica “*think aloud*”<sup>4</sup>. I risultati vengono collezionati attraverso osservazioni non intrusive e questionari.

**Performance testing:** simile al precedente ma vengono introdotte delle metriche per la misurazione di efficacia, efficienza e gradimento della soluzione proposta.

**Subjective evaluation:** le valutazioni soggettive degli utenti vengono statisticamente analizzate. Nell’utilizzo di questa tecnica, forma e struttura del questionario rivestono un ruolo fondamentale.

**Pleasure:** il livello di gradimento dell’utente è un parametro che può essere valutato attraverso un questionario ben strutturato. Questo tipo di valutazione è complementare a ciascuna delle tecniche sopra-elencate.

---

<sup>4</sup> Il metodo *think-aloud* fu ideato all’interno di IBM e prevede che, durante i test di usabilità, gli utenti esprimano a voce alta, durante l’esecuzione dei task, tutto quello che stanno pensando.

## 2.4. Possibili scenari evolutivi per le HCI. Connessione, intelligenza e realismo.

La necessità di progettare interfaccia uomo-macchina sempre più efficaci nasce dal *gap* tra il modo di ragionare e percepire tipico dell'uomo ed il modo di ragionare e comportarsi tipico dei sistemi complessi ad elevato grado di automazione. La maggior parte di tali sistemi appartiene a settori *safety-critical* come, ad esempio, l'aviazione, la chirurgia, la gestione delle emergenze o gli impianti ad alto potenziale inquinante. Gli sviluppi recenti e la continua evoluzione di tali sistemi permette di ipotizzare alcuni scenari evolutivi anche per le interfacce, considerando che il ruolo di esse diventerà sempre più determinante.

Non è possibile progettare un sistema fortemente automatizzato senza tenere in grande considerazione la progettazione dell'interfaccia uomo-macchina associata. Nel settore dell'aviazione, principalmente nell'ambito dei *cockpit* degli aeromobili, esistono molti studi focalizzati sul miglioramento delle HMI. Stessa cosa accade in quel settore della chirurgia moderna che viene denominato *computer-assisted surgery*. L'attività cognitiva del chirurgo infatti, può essere supportata da *displays* che siano in grado di “fondere” le tante informazioni necessarie; inoltre l'attività manuale del chirurgo può essere aiutata da sistemi automatizzati e robotici al fine di migliorare la precisione nell'intervento riducendo il *workload* del chirurgo.

Una corretta ed efficace progettazione di interfaccia non ha come unico vantaggio il miglioramento delle performance in campo operativo, ma permette anche di ottenere un addestramento più rapido ed efficace. Questo duplice effetto è evidente nel caso dei *cockpit* aeronautici, dove la sinergia tra interfacce ben concepite e simulatori di volo realistici ha portato a risultati eccellenti.

Sulla base di quest'ultima considerazione, si ipotizza che lo studio delle HMI sarà, in futuro, sempre più focalizzato su alcuni aspetti che sono al confine tra il campo operativo e quello dell'addestramento, ovvero:

- autonomia ed intelligenza
- connessione e interoperabilità
- realismo

### 2.4.1. Autonomia ed intelligenza

Oltre alle funzioni di *display* e *control*, una caratteristica fondamentale per le HMI in contesti fortemente automatizzati è la possibilità di fornire un supporto alle decisioni (*decision aid*) e di compiere scelte in autonomia (*decision making*).

Al crescere del livello di autonomia dell'interfaccia, il tipo di controllo dell'operatore diventa sempre più di supervisione. La tendenza dei più recenti studi è quella di perseguire un livello di autonomia così elevato da essere paragonato all'intelligenza. Ovvero l'interfaccia dovrebbe essere tale da non permettere all'operatore di comprendere che sta interagendo con una macchina.

### 2.4.2. Connessione e interoperabilità

E' noto come, nel settore aerospaziale, all'interno di un simulatore l'operatore acquisisce le capacità relative al controllo e alla gestione del sistema attraverso la riproduzione a terra dell'interfaccia uomo-aeromobile. Un singolo simulatore non è però in grado di trasferire all'allievo le sensazioni, relative alla presenza degli altri sistemi in evoluzione, che fanno parte di uno scenario vero. In alcuni casi tali sistemi vengono semplificati al fine di popolare l'ambiente e rendere la simulazione verosimile, come ad esempio gli aeromobili pilotati dai cosiddetti pseudo-piloti, impiegati per animare lo spazio aereo e fornire scenari esercitativi per la formazione dei controllori di volo. Rimane comunque viva l'esigenza di trasferire all'operatore le esperienze relative all'impiego del singolo sistema in una

situazione reale, nella quale altri soggetti possano interagire con quello che si sta simulando. Queste considerazioni hanno dato avvio al concetto di Interoperabilità dei sistemi di simulazione. Una definizione di *M&S (Modelling&Simulation)* *Interoperability* è la seguente: “*The ability of a model or simulation to provide services to and accept services from other models and simulations, and to use the services so exchanged to enable them to operate effectively together.*” [DoD 1994]. Applicare questo principio significa integrare più simulatori in grado di emulare uno scenario operativo completo, realizzando così un “*Sistema dei Sistemi*”.

L’incessante diffusione di reti di comunicazione dati sempre più veloci ed efficienti pone le basi per la concreta realizzazione dell’interoperabilità tra sistemi complessi e di diversa natura. La simulazione diventa quindi “distribuita”: numerosi attori, operanti in settori differenti, operano in uno stesso scenario, trasferendosi vicendevolmente i dati di simulazione; il dinamismo dello scenario comune è guidato dagli attori stessi, esattamente come nella realtà.

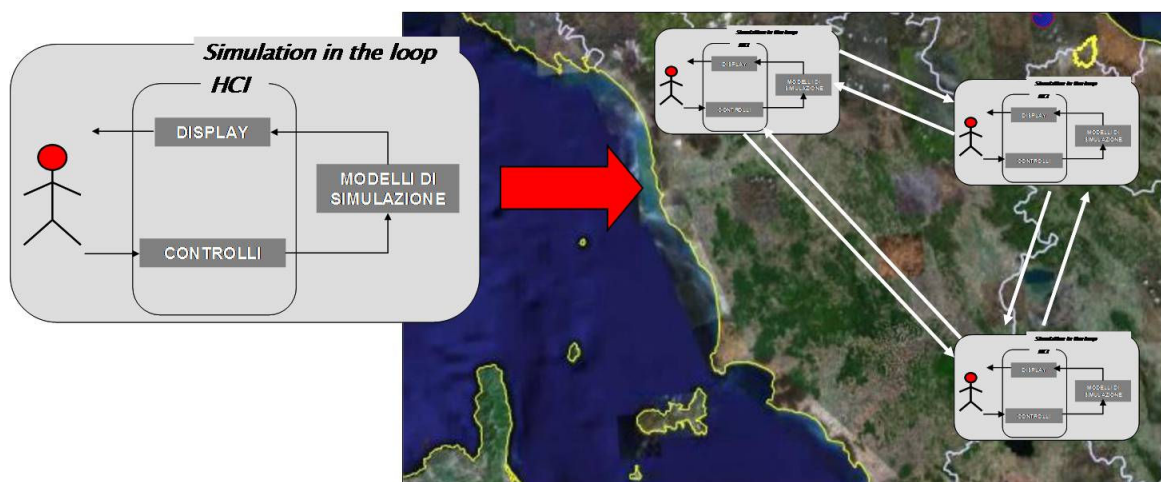


Figura 2-3. Schematizzazione del concetto di simulazione distribuita.

Ne consegue un elevato realismo che coinvolge anche gli aspetti operativi della missione simulata, mettendo in evidenza tutte le criticità, comprese quelle, meno prevedibili, derivanti da fattori umani.

In campo addestrativo i vantaggi , introdotti dall'applicazione di questo concetto, sono molti e possono essere ottenuti anche grazie alla progettazione di HMI che deludano l'aspettativa di elevati gradi di realismo.

### 2.4.3. Realismo

La percezione di un'informazione o di una forma di controllo come “reale”, anche quando essa è artificiale, è un obiettivo molto difficile da perseguire. Nel paragrafo successivo verrà mostrato come le tecniche di realtà virtuale e computer grafica possono contribuire alla realizzazione di interfacce sempre più coinvolgenti e realistiche.

## 2.5. Realtà virtuale e computer graphics

La realtà virtuale è la possibilità di interagire in un ambiente “artificiale” come se si trattasse di un ambiente reale utilizzando oggetti controllati da un computer.

Esistono diversi tipi di dispositivi che forniscono l'illusione di vedere, toccare e manipolare oggetti non reali (simulati). I mondi virtuali, e qualsiasi cosa al loro interno, sono rappresentati mediante modelli matematici.

I primi esperimenti di realtà virtuale possono essere datati alla metà degli anni sessanta con i simulatori di volo realizzati al *M.I.T* da *I. Sutherland*, pioniere della realtà virtuale. Tuttavia è negli anni ottanta che si verifica il grande boom con la nascita nel 1982 della *Silicon Graphics*, azienda leader nel settore.

Uno dei primi progetti di applicazione della *Virtual Reality* al settore dell'assemblaggio e dell'ergonomia, venne realizzato nel 1981 ad opera dell'Aeronautica Militare degli Stati Uniti. Riguardava la realizzazione di un simulacro di cabina di pilotaggio e di un casco virtuale, per visualizzare uno spazio grafico tridimensionale, nel quale i piloti avrebbero imparato a volare e a



combattere. Il *Super Cockpit*, questo il nome del simulatore, riscosse grande successo, ma gli elevati costi di produzione e gestione imposero lo sviluppo successivo, stavolta ad opera della NASA, di modelli più efficienti.

Al *Nasa Research Center* fu presentata così la *Virtual Interface Enviromental Workstation* (*VIEW*), o meglio stazione di lavoro con ambiente ad interfaccia virtuale, destinata alla progettazione di missioni spaziali e fu il primo sistema a combinare grafica computerizzata, immagini video, suono tridimensionale, riconoscimento e sintesi della voce, un casco virtuale ed un guanto tattile. Tra le multinazionali che oggi usano ambienti virtuali per la manutenzione, la creazione di parti meccaniche e l'assemblaggio di sistemi, ricordiamo la *Ford*, la *Boeing* e la *Caterpillar*. Queste figurano, inoltre, tra gli utenti dei più moderni *software* di simulazione del comportamento umano, alcuni dei quali ancora in fase di validazione.

Nella progettazione delle automobili vanno tenuti in debita considerazione diversi fattori connessi all'accessibilità, all'ergonomia e alla presenza dell'uomo, soprattutto in quanto utente finale.

Le simulazioni di realtà virtuale (VR, dall'inglese *Virtual Reality*) differiscono da altre simulazioni computerizzate in quanto richiedono specifici dispositivi, capaci di trasmettere all'operatore le sensazioni visive, acustiche e tattili relative all'ambiente simulato e di registrare e inviare al programma di simulazione le espressioni e i movimenti dell'utente. Sostituendo la tastiera o il *mouse* nell'interazione con il computer, queste interfacce speciali permettono a chi entra in una simulazione VR di muoversi, agire e comunicare con il calcolatore in modo quasi del tutto naturale. L'interazione così immediata e la possibilità di guardare in ogni direzione danno la sensazione di essere all'interno dell'ambiente simulato.

Gli oggetti utilizzati (guanti, cuffie e occhiali) possono sostituire almeno tre dei cinque sensi di cui disponiamo: udito, vista e tatto. Il computer gestisce questo ambiente tridimensionale in modo da rispondere alle azioni messe in atto.

Gli ambienti virtuali vengono, in genere, classificati sulla base di:

**Immersività:** quanto l'utente è coinvolto nella percezione dell'ambiente virtuale. Il grado di immersività aumenta al crescere del numero di sensi coinvolti.

**Intrusività:** un ambiente virtuale è intrusivo se i dispositivi indossati dall'utente per percepirlo sono poco naturali e poco ergonomici.

**Presenza:** il grado di presenza rappresenta la possibilità per l'utente di essere all'interno dell'ambiente virtuale ed interagire con esso.

## 2.5.1. Stereoscopia

Il concetto di visualizzazione 3D **stereoscopica** si differenzia dal 3D classico che prevede la visualizzazione di modelli tridimensionali su uno schermo bidimensionale. Quest'ultimo tipo di visualizzazione è infatti tanto realistica quanto lo è la visione (reale) da parte di un uomo in grado di vedere solo da un occhio. Ciò che si pensa di percepire come profondità è, in questa condizione che viene definita come **monoscopica**, solamente frutto della conoscenza degli effetti della prospettiva. In pratica, si distingue un oggetto lontano da un oggetto vicino poiché si riconosce l'effetto di riduzione delle dimensioni apparenti di ciò che si trova lontano (prospettiva).

Le caratteristiche più importanti della visione monoscopica sono:

**Dimensione relative:** gli oggetti più grandi vengono percepiti come più vicini e viceversa.

**Altezza relativa:** gli oggetti vicini all'orizzonte sono percepiti come più lontani e gli oggetti lontani dall'orizzonte come più vicini all'osservatore.

**Occlusione:** quando sovrapponiamo un oggetto vicino ad uno lontano quello vicino sembra ancora più vicino del secondo che è parzialmente coperto.

**Prospettiva lineare:** linee parallele appaiono convergere all'orizzonte.

**Ombre e luci:** le ombre su un oggetto forniscono informazioni sull'orientamento dell'oggetto stesso nel sistema di riferimento adottato e ne amplificano la tridimensionalità.

**Texture:** quando un oggetto si trova più lontano la *texture* perde definizione.

Attraverso una buona gestione dei parametri caratteristici di queste variabili è possibile ottenere delle visualizzazioni monoscopiche “a due dimensioni e mezzo” che si avvicinano molto a quelle tridimensionali stereoscopiche.

La stereoscopia prende spunto dal fatto che, nella visione della scena reale, l'uomo può percepire la profondità attraverso l'interpretazione delle due immagini differenti (coppia stereoscopica) che vengono proiettate su ciascun occhio. Questo fenomeno naturale può essere riprodotto artificialmente utilizzando varie tecniche; un punto comune per tutti i metodi sotto-elencati è la disponibilità di una coppia stereoscopica che viene ottenuta attraverso il posizionamento, all'interno dell'ambiente virtuale, di due telecamere virtuali. Il posizionamento delle due telecamere virtuali nella scena viene gestito attraverso due parametri principali: la distanza delle telecamere dalla scena osservata (parallasse) e la distanza tra le due telecamere (*offset*).

L'azione di fornire a ciascun occhio l'immagine ad esso destinata, viene svolta principalmente attraverso dispositivi hardware.

## 2.5.2. Dispositivi di visualizzazione

Il **display HMD** (Head Mounted Display) è stato il primo a permettere un'esperienza immersiva a chi lo indossava; la sua commercializzazione risale al 1989 ad opera della *VPL Research*.

Il dispositivo è costituito da due *display* in miniatura e da un sistema ottico in grado di convogliare le immagini dallo schermo agli occhi, per cui si determina una visione stereo. Un tracciatore mobile misura continuamente la posizione e l'orientamento della testa dell'utente, permettendo al computer di generare delle

immagini coerenti, ciò permette al soggetto di guardarsi intorno e camminare attraverso l'ambiente virtuale circostante.

Con queste informazioni, una *workstation* può ricostruire le immagini del mondo virtuale in modo che corrispondano alla direzione e alla posizione di osservazione dell'utente e inviarle all'*HMD*, che le visualizza. La velocità di elaborazione deve essere tale da non produrre nell'utente la sensazione di una discontinuità dell'immagine o di un rallentamento rispetto ai suoi movimenti.

A causa delle imperfezioni degli attuali *display* e dei limiti intrinseci alla grafica computerizzata, i partecipanti ad una simulazione possono facilmente distinguere l'ambiente virtuale dalla realtà.

Gli *HMD* contengono anche cuffie auricolari attraverso le quali l'utente può udire i suoni dell'ambiente simulato. Anche i segnali audio possono essere aggiornati in base alle informazioni rilevate dal sensore di posizione. Il nostro cervello, infatti, confronta i suoni percepiti da ciascun orecchio per localizzare nello spazio la sorgente sonora da cui essi provengono. Quando quest'ultima non è esattamente di fronte o alle spalle dell'ascoltatore, il suono giunge in tempi leggermente diversi alle due orecchie e ciò modifica l'intensità e il timbro percepiti. Il computer, perciò, mediante sistemi altamente sofisticati sfrutta le informazioni sulla posizione del soggetto per inviare in cuffia suoni che appaiano provenire da una precisa locazione dello spazio virtuale.



Figura 2-4. HMD Head Mounted Display.

Il **B.O.O.M** è invece un dispositivo stereoscopico, (*Binocular Omni–Orientation Monitor*) in cui lo schermo ed il sistema ottico sono alloggiati in una scatola collegata ad un braccio articolato.

Questo tipo di dispositivo è appunto quello utilizzato nei prototipi di simulatori integrati da realtà virtuale, per la verifica funzionale nella progettazione di interni di automobili. L'utente guarda all'interno della scatola attraverso due fori, vede il mondo virtuale e lo esplora orientando opportunamente il dispositivo. L'orientamento della scatola è controllato attraverso dei sensori posti nei giunti del braccio articolato.

Il *B.O.O.M.* viene montato su di un telaio su cui sono posizionati gli apparecchi essenziali di un interno di autovettura: il sedile, il volante, un'asta per simulare il cambio e la pedaliera. L'interno virtuale viene visualizzato attraverso il *B.O.O.M.* e l'utente può interagire con questo, grazie all'uso di uno speciale guanto.

Sia HMD che B.O.O.M. sono dispositivi con un elevato grado di intrusività.

Esistono molti altri dispositivi per la visualizzazione stereoscopica di ambienti virtuali che vengono classificati sulla base delle dimensioni massime degli oggetti visualizzabili e del tipo di tecnologie impiegate per ottenere l'effetto stereoscopico.

Tra questi vi sono **WALL** di grandi dimensioni, **CAVE** (*Cave Automatic Virtual Environment*), **teatri virtuali**, **tavoli virtuali** e display.

Le tecniche maggiormente utilizzate per ottenere la stereoscopia in questi dispositivi sono tre:

**Stereoscopia attiva:** si basa sulla proiezione alternata delle due immagini costituenti la coppia stereoscopica su schermi di proiezione e sulla sincronizzazione con occhiali elettronici (LCD shutter-glasses), il cui compito è quello di occludere la lente dell'occhio sinistro quando sullo schermo è proiettata l'immagine destinata all'occhio destro e viceversa, con una frequenza tale da non far percepire all'utente l'alternarsi delle immagini (maggiore di 24 Hz).

**Stereoscopia passiva:** si basa sulla proiezione contemporanea delle due immagini costituenti la coppia stereoscopica su schermi di proiezione, che devono necessariamente essere non-depolarizzanti, con un opportuno sistema di filtri polarizzati linearmente o circolarmente. I filtri sono montati su ciascuno dei due proiettori e sugli occhiali indossati dall'utente. La direzione di polarizzazione della lente destra degli occhiali è identica alla direzione di polarizzazione della lente montata sul videoproiettore che proietta l'immagine per l'occhio destro; viceversa per l'occhio sinistro vi sarà un'altra direzione di polarizzazione. Questa tecnica permette di ottenere dei buoni effetti stereoscopici a patto che si disponga di proiettori ad alta luminosità.

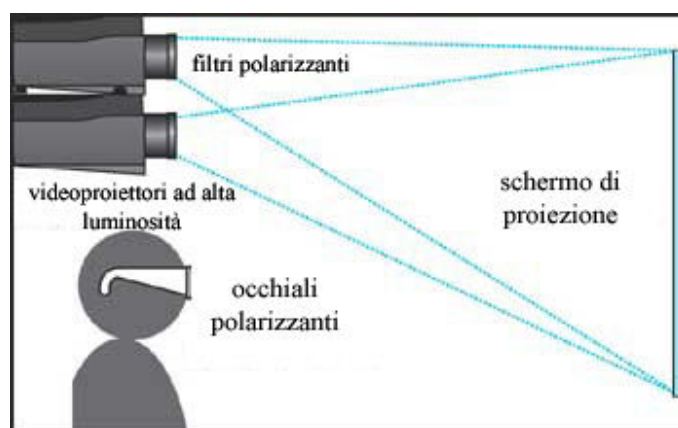


Figura 2-5. Schematizzazione della tecnica di stereoscopia passiva.

**Autostereoscopia:** i display auto stereoscopici sono schermi capaci di ricostruire una visione tridimensionale senza bisogno di alcun occhiale. Il cuore di questo metodo sta in un fenomeno, chiamato "barriera di parallasse" (*parallax barrier*). Di fatto, è lo stesso usato nei comuni adesivi con ologrammi per bambini. Si fa in modo che l'immagine percepita dipenda dall'angolo con cui si guarda il monitor.

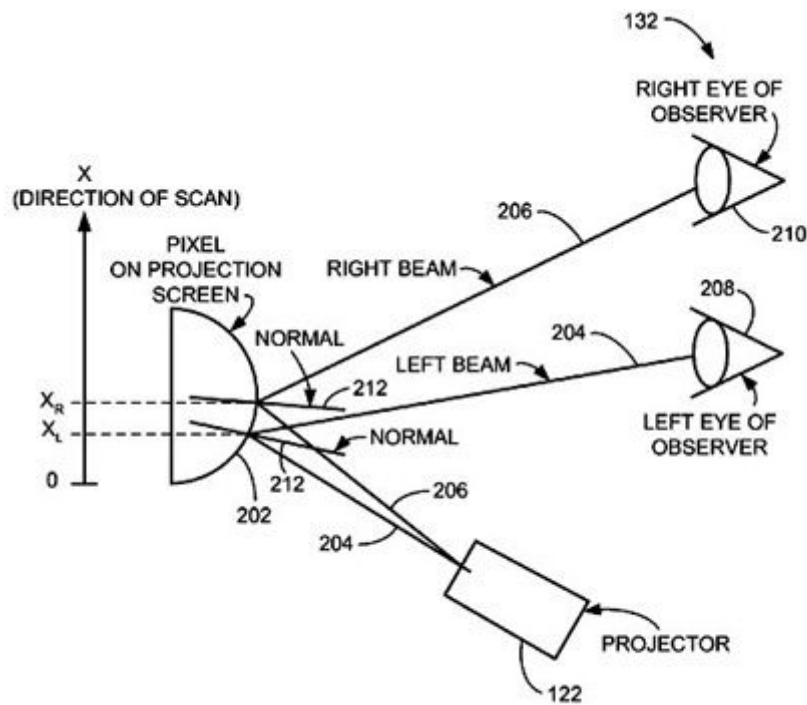


Figura 2-6. Schema del principio che sta alla base della tecnica impiegata per ottenere l'autostereoscopia (senza occhiali).

In questo modo gli occhi di un osservatore ben posizionato al centro dello schermo vedranno due immagini diverse che, se opportunamente calcolate dal costruttore, daranno vita alla visione stereoscopica.

La barriera di parallasse è in pratica costituita da una serie di fessure verticali interposte tra la matrice attiva del monitor LCD e la sorgente di luce del display.

Se adeguatamente posizionata, la barriera permette di vedere solo le colonne dispari o solo le colonne pari del display, in base all'angolazione visiva degli occhi del soggetto.

Recenti studi hanno permesso di ottenere display autostereoscopici con angoli di visione molto ampi.

### 2.5.3. Dispositivi di interazione

I dispositivi di interazione in realtà virtuale sono molti e di diverso tipo; un particolare interesse è da sempre rivolto a quei dispositivi di interazione capaci di coinvolgere il senso del tatto.

Il termine "tattile" si riferisce globalmente alle sensazioni che una persona riceve attraverso la pelle. Le interfacce tattili per la realtà virtuale richiedono tecnologie ancora più avanzate di quelle necessarie per le simulazioni visive e acustiche e rappresentano tuttora un campo di ricerca aperto. Mediante un guanto e un rilevatore di posizione, un calcolatore localizza la mano dell'utente e apposite tecniche individuano i movimenti delle dita, in modo che l'utente sia in grado di maneggiare gli oggetti pur senza percepirli.



Figura 2-7. Guanti virtuali: permettono l'interazione con oggetti virtuali senza percepirne il feed-back.

È estremamente difficile, infatti, riprodurre le sensazioni che si sperimentano colpendo una superficie rigida, raccogliendo un oggetto o facendo passare le dita su un tessuto. Per simulare tali sensazioni occorrerebbe una serie di motori controllati dall'elaboratore, capaci di generare le forze di reazione agendo direttamente sul corpo del soggetto, che richiederebbero una velocità e



un'accuratezza superiore a qualsiasi modello attualmente disponibile. Un altro problema di difficile soluzione è come far indossare all'utente simili apparati, completi di tutti i collegamenti necessari al loro controllo. Le sensazioni tattili, infine, dovrebbero essere sincronizzate con quelle visive e acustiche prodotte dagli altri dispositivi.

Diverse aziende hanno recentemente messo a punto dispositivi da tavolo che, attraverso collegamenti meccanici, applicano piccole forze a una bacchetta tenuta in mano dando la sensazione di esplorare con una matita il mondo virtuale: l'utente che tiene la matita percepisce il momento in cui la sua punta incontra un oggetto simulato e può trascinarla sulla superficie di questo per avvertirne la forma o le scabrosità.



# Capitolo 3

## Il Sistema Traffico Aereo e il Ruolo delle Interfaccia

### 3.1. Cenni storici

Il 7 dicembre 1903, a Kitty Hawk, nella Carolina del Nord (USA), un fragile velivolo costruito in metallo, legno e tela si leva dal suolo con i propri mezzi, riuscendo a restare in volo per pochi secondi e percorrendo 260 metri: è la prima volta che l'uomo riesce a volare su un mezzo più pesante dell'aria spinto da un motore. Dopo questo primo volo realizzato da Wilbur e Orville Wright l'aeronautica, in un secolo, compie passi da gigante.

Nei primi tempi, tuttavia, l'aeromobile è visto in Italia più come qualcosa da destinare a temerari piuttosto che come un potenziale mezzo di trasporto collettivo. Sono, infatti, maggiormente messe in evidenza le applicazioni del mezzo aereo in campo militare o il conseguimento dei primati piuttosto che valorizzarne le prime applicazioni nel settore dei trasporti. Vasta eco hanno infatti le imprese dei singoli quali, per esempio, il record di altezza realizzato da Mario Pezzi che con un Caproni 161 bis raggiunge i 17083 metri di quota (record mai superato per

un aereo ad elica) o le imprese collettive quali le transvolate atlantiche di Italo Balbo, che nel dicembre del 1930 con una formazione di 10 idrovolanti Siai Marchetti S-55 raggiunge il Brasile e due anni dopo effettua una traversata molto più impegnativa, il sorvolo dell'Atlantico, in andata e in ritorno con una formazione di 24 idrovolanti.

Negli Stati Uniti, a causa della vastità del territorio, il mezzo aereo viene ben presto utilizzato per scopi commerciali: risale al 1911 il primo servizio di trasporto aereo postale, mentre nel 1935 il primo aereo civile, il DC-3, prodotto dalla casa americana Douglas, effettua i primi voli di linea raggiungendo la velocità di 250 km/h.

Prima del 1930, negli Stati Uniti, non era ancora sentita la necessità di un sistema organizzato di controllo del traffico, in quanto tutti gli aeromobili volavano solo nelle ore diurne, in condizioni di perfetta visibilità e con modeste velocità: erano pertanto gli stessi piloti a mantenere le separazioni evitando situazioni di pericolo.

Dopo il 1930, l'introduzione della strumentazione giroscopica, unitamente alla disponibilità dei primi radio-aiuti, consentì la possibilità di effettuare voli notturni e di atterrare e decollare anche quando le condizioni meteorologiche non consentivano di vedere e di essere visti dagli altri aerei.

Furono, pertanto, impiegate le prime torri di controllo dalle quali, prima con segnalazioni a mezzo di bandiere, poi con segnali luminosi e, infine, con la radio, si poteva comunicare con i piloti.

Il primo sistema di controllo del traffico aereo nacque nel 1930 a Cleveland, Ohio, dove, disponendo del primo apparato radio trasmittente, l'assistenza al volo cominciò ad assumere una ben precisa fisionomia poiché, grazie alla radio, non si limitava più a disciplinare solo il traffico aeroportuale, ma andava oltre fino a fornire un'assistenza anche lungo la rotta.

In Italia il controllo del traffico aereo fino al 1979 è stato svolto dall'Aeronautica Militare tramite l'ITAV (Ispettorato Telecomunicazioni ed Assistenza al Volo); la stessa Direzione Generale dell'Aviazione Civile fino agli anni sessanta faceva parte del Ministero della Difesa e non del Ministero dei Trasporti.

Nel 1979, con un decreto legge, si avviò il processo di smilitarizzazione del controllo del Traffico Aereo che, passando per il Commissariato per l'Assistenza al Volo (1981) e per l'istituzione dell' AAAVTAG (Azienda Autonoma di Assistenza al Volo e per il Traffico Aereo Generale), ha portato alla costituzione dell'ENAV (Ente Nazionale Assistenza al Volo) nel 1996 e alla sua recente trasformazione in società per azioni.

Il successo del trasporto aereo è reso evidente dal continuo aumento del numero di passeggeri e delle tonnellate di merci trasportate.

Il successo del trasporto aereo non sarebbe stato possibile senza la necessaria cooperazione internazionale, indispensabile per lo sviluppo progressivo di una rete di linee aeree ed aeroporti, resa attuabile soprattutto dall'ICAO (*International Civil Aviation Organization*).

Senza tale organizzazione gli Stati avrebbero dovuto concludere accordi bilaterali per risolvere ogni tipo di questione giuridica e il trasporto aereo, di conseguenza, sarebbe precipitato nel caos.

Oggi, invece, su un qualsiasi aeromobile l'equipaggio è fornito di brevetti rilasciati secondo standard internazionali comuni, ogni aereo è certificato per la navigabilità con riconoscimento di tutti gli Stati, le comunicazioni con i centri di controllo avvengono con procedure che sono le stesse in tutto il mondo, gli aeroporti e le radioassistenze devono rispondere agli stessi requisiti internazionali.

## 3.2. Il sistema traffico-aereo

Gli stati membri dell'ICAO sono tenuti ad indicare, in accordo con quanto stabilito nell'annesso 11 (Servizi del Traffico Aereo), e per i territori sotto la loro giurisdizione, quelle porzioni di spazio aereo e quegli aeroporti dove è necessario assicurare un servizio di traffico aereo. Nel delimitare lateralmente gli spazi aerei, entro i quali è fornito il servizio di traffico aereo, viene tenuto conto delle esigenze dei servizi stessi, più che della conformazione dei confini nazionali dei vari stati. Grazie ad accordi bilaterali, quindi, è possibile che spazi aerei appartenenti ad uno stato siano sotto la giurisdizione di un altro, così come porzioni di oceano o

acque extraterritoriali possono essere sotto la competenza di un altro stato, che però si dovrà impegnare ad assicurare servizi del traffico aereo con standard e procedure conformi a quelle indicate nell'annesso 11. Tutto ciò deve essere noto tramite debite pubblicazioni sugli AIP (*Aeronautical Information Publication*) nazionali. Dopo aver stabilito la fornitura del servizio di traffico aereo, lo Stato dovrà indicare un'autorità responsabile che potrà essere lo Stato stesso o un'agenzia privata. Nel caso italiano i servizi del traffico aereo (ATS) sono forniti dall' ENAV e dall'Aeronautica Militare Italiana.

### 3.2.1. Principali Obiettivi del Servizio del Traffico Aereo

Gli obiettivi che l'ICAO si prefigge nell'istituzione dei servizi del traffico aereo sono:

- 1) prevenire le collisioni tra gli aeromobili;
- 2) prevenire le collisioni tra aeromobili ed ostacoli sull'area di manovra;
- 3) accelerare e mantenere un ordinato flusso del traffico aereo;
- 4) fornire avvisi ed informazioni utili per una sicura ed efficiente condotta dei voli;
- 5) informare le appropriate organizzazioni riguardo aeromobili che necessitano di ricerca e soccorso.

Questi obiettivi vengono perseguiti attraverso i seguenti quattro servizi:

- Il Servizio Di Controllo Del Traffico Aereo (ATCS), è istituito allo scopo di prevenire collisioni tra aeromobili (obiettivo 1), tra aeromobili ed ostacoli presenti sull'area di manovra (obiettivo 2) e mantenendo il flusso del traffico aereo ordinato e spedito (obiettivo 3).

Esso si divide in:

- a) Servizio di Controllo d'Area;
- b) Servizio di Controllo di Avvicinamento;
- c) Servizio di Controllo di Aerodromo.

- Il Servizio Informazioni Volo (FIS), è istituito allo scopo di fornire consigli ed informazioni utili agli aeromobili in volo per una sicura ed efficiente condotta dei voli medesimi (obiettivo 4). Tale servizio viene fornito a tutti gli aerei che sono in qualche modo conosciuti dagli enti ATS.
- Il Servizio d'Allarme (ALS), è istituito allo scopo di notificare agli appropriati Enti che si occupano della ricerca e del soccorso notizie ed informazioni utili circa aeromobili che sono scomparsi o che necessitano di aiuto.
- Il Servizio Consultivo (ADS), non sempre presente in tutti gli spazi aerei, assicura una separazione, simile, per quanto possibile, a quella che viene assicurata nello spazio aereo controllato tra gli aerei che volano con piano di volo IFR. In Italia è presente solo nello spazio aereo classificato "F".

La necessità di istituire un servizio di traffico aereo in un determinato spazio aereo o uno specifico aeroporto può essere condizionata da svariati motivi, primi fra tutti rivestono particolare importanza il tipo e la densità del traffico che lo utilizza. Importanti sono pure le condizioni atmosferiche prevalenti sulla zona ed infine la conformità del terreno e l'orografia circostante l'aeroporto.

### 3.2.2. Organizzazione degli spazi aerei

Le FIR (acronimo di *Flight Information Region*) sono spazi aerei di determinate dimensioni, entro cui, a tutti gli aeromobili che lo desiderano, vengono sicuramente forniti il Servizio informazioni volo (*FIS - Flight Information Service*) e il Servizio di allarme (*ALS - Alerting Service*). La FIR è il più grande spazio aereo istituito dall'ICAO e racchiude tutti gli altri spazi aerei, compresi gli spazi aerei e gli aeroporti controllati. Le porzioni non controllate della FIR non potranno, ovviamente, usufruire del servizio ATCS che è una caratteristica peculiare di tali spazi. L'Ente che opera all'interno della FIR, al di fuori degli spazi aerei controllati, è il FIC (*Flight Information Centre*). I limiti laterali di una FIR sono stabiliti in base ad accordi regionali. Per quanto riguarda la dimensione verticale della FIR, generalmente lo spazio aereo viene suddiviso in una parte

inferiore denominata FIR, che parte dal livello del terreno (GND) e si estende fino a FL195 incluso, e da una porzione superiore denominata UIR (*Upper Information Region*), che inizia al di sopra di questo livello e si estende fino all'infinito: UNL (*Unlimited*). La FIR è generalmente classificata "G" mentre la UIR si divide in due settori, da FL195 a FL460 (spazio aereo C) controllato, e da FL460 a FL UNL (spazio aereo G) non controllato. In Italia sono presenti tre FIR, quella di Milano, quella di Roma e quella di Brindisi. Le FIR contengono le TMA, le rotte ATS, i CTR e gli ATZ. La rappresentazione grafica nelle carte della FIR: è una linea continua con barrette laterali.

Le CTA sono spazi aerei controllati che si estendono verso l'alto da un determinato livello a partire dalla superficie terrestre. Esse sono state concepite in modo da contenere tutte le traiettorie dei voli IFR ai quali si vuole fornire il servizio di controllo del traffico aereo, tenendo conto della presenza a terra di adeguate radioassistenze. Le CTA contengono e sono caratterizzate dalle TMA (*Terminal Area*) e dalle Aerovie (AWY). Le CTA inoltre, come limite verticale inferiore, devono essere obbligatoriamente sollevate dal terreno di almeno di 700 piedi o più, in modo tale da consentire, al di sotto di esse, il libero svolgimento dei voli VFR.

La regione di Milano ,ad esempio, è stata istituita per incanalare il traffico in partenza e arrivo dagli aeroporti di: Malpensa, Linate, Bergamo, Lugano, Torino, Genova, Piacenza e Parma.



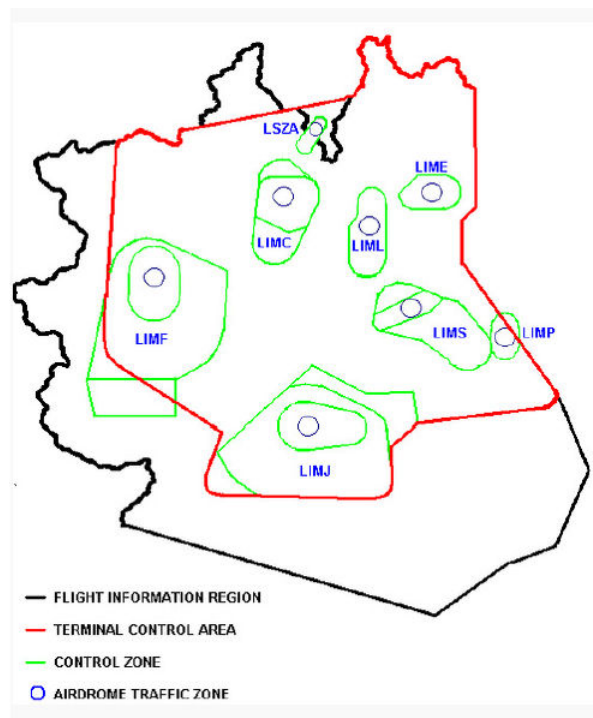


Figura 3-1. TMA di Milano e relativi CTR.

All'interno delle CTA vengono forniti i servizi di ATCS, FIS e ALS dal ACC (*Area Control Center*). Le TMA (*Terminal Area*) sono delle regioni di controllo istituite alla confluenza di più aerovie ed in coincidenza di uno o più importanti aeroporti. Esse hanno lo scopo di disciplinare il traffico aereo in ingresso ed in uscita dai vari CTR ad esse associati e di facilitare l'inserimenti in rotta di tali traffici. La rappresentazione grafica nelle carte della CTA: è una linea continua marcata.

Le AWY (*Airway*), facenti anch'esse parte della CTA, sono spazi aerei a forma di "corridoio", servite da una o più radioassistenze, che collegano tra loro le diverse TMA ed i più importanti aeroporti.

La rappresentazione grafica nelle carte delle AWY: sono delle linee parallele continue, o un retinato.

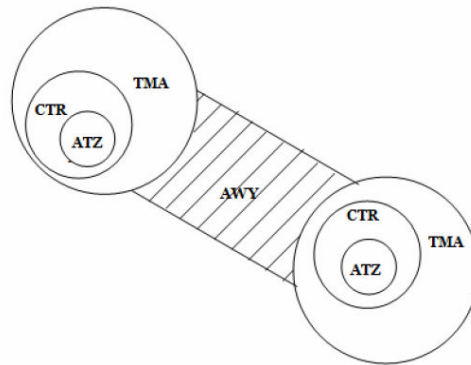


Figura 2-2. Schema concettuale dell'organizzazione degli spazi aerei

I CTR sono zone di spazio aereo controllato che si estendono dal suolo fino a un limite specificato superiore, in corrispondenza di uno o più aerodromi. Essi possono essere definiti come “zone di raccordo” tra gli aeroporti le TMA e le Aerovie. Le dimensioni e la forma dei CTR sono variabili e dipendono, principalmente, dalla conformazione delle procedure di arrivo e di partenza strumentali che devono essere interamente contenute all'interno dello spazio aereo controllato. Ad esempio, il CTR di Parma è molto ridotto, con un limite superiore di appena 3000 piedi, mentre quello di Garda ha un limite superiore fino a FL245. In ogni caso l'ampiezza laterale di una zona di controllo non deve mai essere inferiore alle 5 miglia nautiche rispetto al centro dell'aeroporto. L'ente che fornisce i servizi del traffico aereo (ATCS, FIS e ALS) all'interno del CTR è l'APP (*Approach Control*). All'interno del CTR si trova l'ATZ.

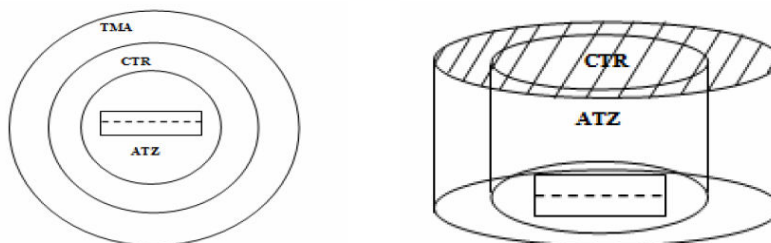


Figura 3-3. Schema concettuale delle TMA

La rappresentazione grafica nelle carte del CTR: è una linea tratteggiata L'ATZ è uno spazio aereo istituito attorno ad un aeroporto a protezione del traffico di aerodromo. Esso, presenta un raggio medio di circa 2 - 5 miglia nautiche ed un altezza di circa 2000 piedi. Sono due gli enti che possono operare all'interno di un ATZ: la TWR (*Tower*) o l'AFIS (*Aerodrome Flight Information Service*). La TWR contraddistingue uno spazio aereo ATZ controllato e quindi fornirà l'ATCS, il FIS e l'ALS. Mentre l'AFIS caratterizza uno spazio aereo ATZ non controllato fornendo solamente il FIS e l'ALS.

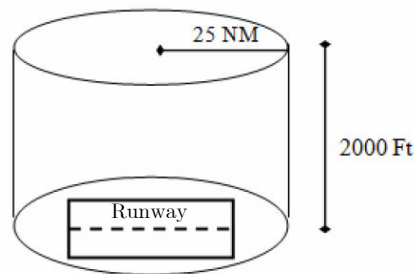


Figura 3-4. L'ATZ e la sua estensione nello spazio

Riassumendo un volo completo passa attraverso i seguenti centri di controllo:

- *tower control* (in realtà *tower+ground*)
- *approach control*
- *upper airspace control*

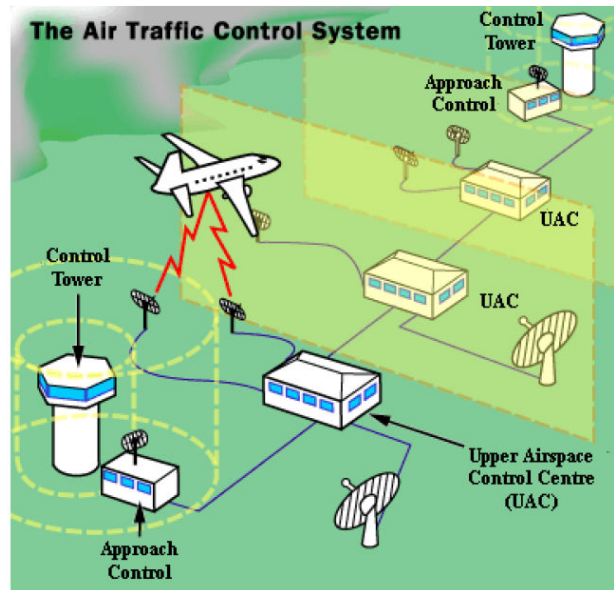


Figura 3-5. I centri di controllo del traffico aereo

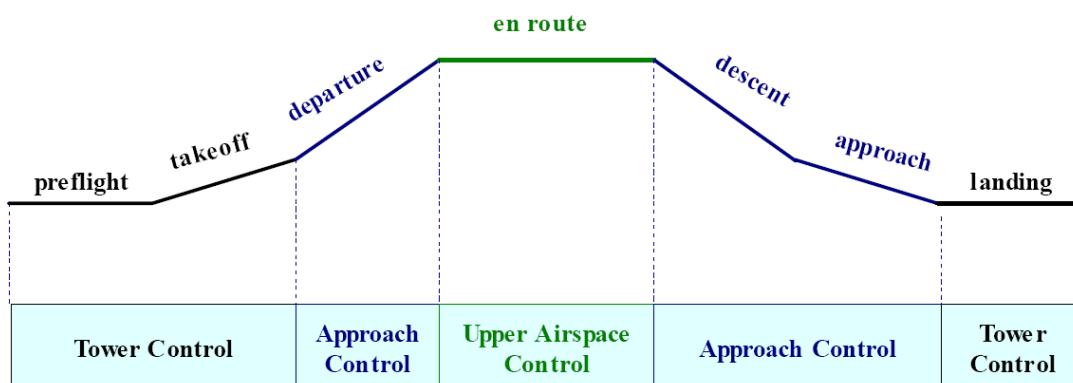


Figura 3-6. Le fasi di un volo completo ed i relativi centri di controllo

### 3.2.3. Classificazione degli spazi aerei

Dal 1992 anche l'Italia, insieme agli altri stati europei, ha adottato la nuova classificazione ICAO degli spazi aerei. Nel redigere la nuova normativa, che dovrebbe armonizzare le operazioni di volo, entro le aree ad uso promiscuo IFR/VFR, gli esperti hanno stabilito che ogni classe di spazio aereo porta con sé le regole che i piloti devono rispettare e i servizi che gli enti ATS devono fornire.

Gli spazi aerei sono stati suddivisi in sette classi, contraddistinte dalle lettere dalla A alla F, che sintetizzano le condizioni in cui devono essere condotti i voli in IFR e VFR. Le lettere A, B, C, D, E individuano gli spazi aerei controllati; le lettere F, G individuano gli spazi non controllati. Ogni stato deve comunque provvedere a riportare le lettere designatrici lungo i confini dei vari spazi aerei, rappresentati sulle carte di navigazione, in modo da consentire ai piloti di avere la percezione immediata del traffico che potranno incontrare nello spazio aereo in cui si apprestano ad operare.

### **3.2.4. Le rotte ATS e le rotte R-NAV**

Parlare solamente di rotte ATS sarebbe riduttivo, esse possono indicare un aerovia (AWY), una rotta a servizio consultivo (ADR), una rotta condizionata (CDR), una rotta R-NAV o una rotta VFR. Le rotte ATS sono degli grandi “corridoi” in cui viene incanalato e reso fluido e spedito il traffico aereo. I piloti prima di un volo pianificano il proprio percorso fino all’aeroporto di arrivo, inserendo nel piano di volo diverse rotte ATS, sarà poi compito del controllore fornire re-instradamenti più brevi e diretti. Le rotte R-NAV, sono speciali percorsi percorribili dagli aeromobili, anche senza l’apporto di radioassistenze al suolo. Ciò è possibile grazie ad avanzati sistemi di bordo quali FMS, GPS, IRU, ecc. Se non si dispone di determinati equipaggiamenti il volo dovrà essere effettuato su rotte ATS non R-NAV, avvalendosi dell’utilizzo di radioassistenze come VOR o NDB.

### **3.2.5. La designazione di rotta, punto significativo, SID o STAR**

I piloti che si accingono a preparare un volo devono prima di tutto tracciare la corretta rotta per arrivare all’aeroporto di destinazione. Sulle carte, essi, possono trovare i nomi delle rotte, dei punti significativi o di particolari procedure che dovranno accingersi a compiere per instradarsi in un percorso prefissato. Per evitare problemi, e per rendere l’identificazione di tali il più semplice possibile,

l'ICAO ha determinato diversi criteri per designarli. Per le rotte ATS è necessario un designatore basico, composto da numeri (da 1 a 999), con l'aggiunta di:

- a) un prefisso;
- b) una lettera.

Normalmente i caratteri che designano una rotta sono cinque ma non possono eccedere i sei. Per individuare le lettere, invece, si usano questi criteri:

- a) A, B, G, R, fanno parte delle reti regionali di rotte ATS, ma non sono rotte di navigazione d'area;
- b) L, M, N, P, fanno parte delle reti regionali di rotte ATS e di quelle di navigazione d'area;
- c) H, J, V, W, non fanno parte né delle reti regionali di rotte ATS né di quelle di navigazione d'area;
- d) Q, T, Y, Z, non fanno parte delle reti regionali di rotte ATS, ma racchiudono le rotte d'area.

Si possono inoltre aggiungere altri tre tipi di lettere alla designazione della rotta:

- a) K (Kopter) indica una rotta usata esclusivamente dagli elicotteri, situata a bassa quota;
- b) U (Upper) indica che la determinata rotta è situata nello spazio aereo superiore;
- c) S (Supersonic) indica una rotta usata esclusivamente da aeromobili supersonici.

I punti significativi sono designati per definire una rotta ATS, dando punti di riferimento al pilota.

Alcuni esempi di FIX nella FIR di Milano: i FIX, molto spesso, fanno riferimento alle radioassistenze in modo che i piloti, grazie agli apparati di bordo, abbiano la capacità di trovare la loro posizione. Il nome di un FIX deve essere semplice e facilmente pronunciabile in modo che si riducano drasticamente le incomprensioni tra pilota e controllore. Inoltre, i vari FIX spesso prendono il nome dalla località geografica o radioassistenza più vicina. Il nome deve avere un massimo di sei lettere composto da due o tre sillabe Esempio: FUERSTENFELDBRUCK = FURSTY.

Le SID (*Standard Instrumental Departure*), sono rotte istituite nei CTR per far sì che il traffico strumentale in partenza dagli aeroporti situati nei CTR, sia separato dagli ostacoli sottostanti anche durante la salita iniziale. L'utilizzo delle SID, inoltre, rende più scorrevole il flusso del traffico aereo ed evita la congestione delle frequenze ATC, in quanto permette ai controllori di non istruire continuamente i piloti durante la fase di salita iniziale dall'aeroporto di partenza, fino alla loro successiva entrata in rotta. Ogni SID, ha un nome necessario per la sua identificazione, questo nome è composto da caratteri alfanumerici e la denominazione che ne risulta è riferita a punti caratteristici del terreno, a città, ad intersezioni, a radioaiuti oppure ad aree particolari. Il nome della SID è quindi composto da:

- a) il nome della radioassistenza (o punto) inserita nelle rotte ATS sulla quale la SID termina;
- b) l'indicatore di validità (un numero);
- c) l'indicatore di rotta (una lettera);
- d) la parola DEPARTURE.

Per esempio:

- a) TOP6A = designatore in codice
- b) TORINO SIX ALFA DEPARTURE = designatore in chiaro

Le STAR (*Standard Terminal Arrival Routes*), sono rotte terminali standard di arrivo istituite per facilitare la parte del volo che va da un'aerovia fino all'aeroporto di destinazione dell'aeroplano. Si può dire che le STAR sono l'opposto delle SID, per quanto riguarda la tratta di volo che interessano e la loro composizione (rotte, quote, ecc.). Le caratteristiche di denominazione delle STAR, non differiscono da quelle di denominazione delle SID. L'unica differenza con le SID è solamente il nome della radioassistenza o punto, che non è più la prima /o in rotta bensì l'ultimo. Inoltre la parola DEPARTURE è sostituita con ARRIVALS.

### 3.3. L'automazione dei servizi ATC

Con l'avvento del radar si è passati dal controllo procedurale al controllo radar che ha permesso di ridurre le separazioni tra gli aeromobili, in virtù sia della maggiore precisione delle informazioni radar, rispetto a quelle ottenute dai rapporti di posizione, sia della possibilità di ottenerle con elevata frequenza.

Inoltre, la presenza del radar secondario ha portato ad ulteriori vantaggi quali la facilità di procedere all'identificazione dei velivoli con maggiore affidabilità, la ricezione automatica dei dati di volo, la semplificazione del coordinamento tra i vari settori di controllo e la riduzione dei collegamenti terra-bordo. Al controllo radar è comunque sempre abbinata la possibilità di passare al controllo procedurale, in modo che il servizio di controllo possa continuare ad essere assicurato anche in caso di avaria dell'apparato radar o nel caso in cui le informazioni radar risultassero poco affidabili.

Col controllo procedurale la presentazione del traffico è tabulare, dato che si utilizzano le *strips* (cartacee o elettroniche); con quello radar è invece panoramica, fornita dallo schermo radar sul quale viene osservata l'intera situazione dell'area sotto controllo.

I due sistemi di controllo radar e procedurale, senza un sostegno da parte dell'automazione, si sono mostrati da alcuni decenni incapaci di poter svolgere in modo sicuro la propria funzione: ciò è dovuto essenzialmente all'incessante sviluppo del traffico aereo ed alla sua eterogeneità.

Il controllo procedurale comporta distanze minime di separazione troppo elevate non più ammissibili, a causa dell'impatto sulla capacità delle aerovie e gli aeroporti; quello radar d'altra parte, pur riducendo queste distanze, non permette di assistere più di un certo numero di aeromobili nello stesso tempo. Né è possibile, per tenere conto delle attività legate all'aumento della densità del traffico, ridurre l'estensione dei settori di controllo; si andrebbe incontro ad un aumento di coordinamento tra gli operatori di settori adiacenti, con un accumulo di lavoro a discapito del controllo stesso.



Circa l'acquisizione e lo sviluppo dei piani di volo si possono avere: errori nei messaggi, di formato e di logica, ritardo nel loro inoltro, errori nella compilazione delle strisce progresso volo. La pianificazione dei voli affidata esclusivamente all'esperienza del singolo controllore dipende dalle sue condizioni psicofisiche: è stato constatato che spesso ogni controllore risolve in modo diverso una medesima situazione di traffico (*Human Factors*).

Per quanto riguarda il radar, l'inseguimento a vista dei bersagli sullo schermo comporta un carico di lavoro non indifferente, aggravato dalla necessità di riconoscere gli echi veri da quelli falsi, dovuti questi ultimi al *clutter* del terreno, a quello meteorologico o a propagazioni anomale.

L'automazione quindi non poteva essere ignorata nel controllo del traffico aereo: essa ha avuto nel tempo vari stadi di sviluppo, al passo di quelli dell'informatica, con un approccio prudente e sempre a seguito di una opportuna sperimentazione in campo operativo.

Nel contempo non sono stati trascurati gli studi per le applicazioni delle tecniche satellitari per il posizionamento degli aeromobili, per le comunicazioni e per la meteorologia onde favorire i centri di controllo.

Un sistema di controllo automatizzato, noto in generale con il termine ATCAS (*ATC Automated System*), prevede tre unità fondamentali: il **sottosistema sensori** rappresentato dalla rete di radar sparsi sul territorio, il **sottosistema elaborazione dati**, ubicato nelle sale apparati dei centri operativi ed il **sottosistema interfaccia**, ubicato nelle sale operative.

Le principali aree di automazione sono quelle relative al trattamento dei dati radar e di quelli di volo e all'interfaccia controllore-sistema di controllo; per ciascuna di queste funzioni è previsto un vasto numero di funzioni automatizzate, sviluppate mediante calcolatori e software.

### 3.4. Ambiti di interesse per lo sviluppo di applicazioni innovative: training and operational

Nei paragrafi precedenti abbiamo visto come il controllo del traffico aereo e più in generale il mondo dell'aviazione siano fortemente cambiati, nel corso di pochi decenni, evolvendosi ed integrando automazione ed informatizzazione in ogni tipo di controllo.

Gli attuali sistemi per la gestione **operativa** del traffico dal lato controllore, dal lato pilota e per le comunicazioni terra-bordo-terra si basano su tecnologie all'avanguardia, basti pensare al *Multi-Radar Tracking*, al sistema anti-collisione TCAS (*Traffic Collision Avoidance System*), al *data-link*.

E' da notare come vi sia una forte connessione tra l'evoluzione dei sistemi operativi e l'evoluzione dei sistemi di **addestramento**. L'addestramento degli operatori che dovranno interagire con sistemi complessi e fortemente automatizzati assume una funzione strategica fondamentale per un efficace utilizzo dei sistemi in fase operativa. Nel settore dell'aviazione sono universalmente riconosciuti i vantaggi dell'utilizzo di simulatori avanzati in termini di riduzione dei costi e dei tempi di formazione dei piloti, nonché l'abbattimento dei rischi delle esercitazioni in volo ed il conseguente aumento delle condizioni di sicurezza. E' più recente invece l'adozione di sistemi di simulazione avanzati nell'addestramento degli operatori del controllo del traffico aereo (ATCO *Air Traffic Control Operators*). Questo settore, che inizialmente sfruttava tecnologie già sviluppate per i simulatori di volo, è attualmente in forte sviluppo. L'obiettivo è quello di ottenere sistemi di addestramento sempre più realistici e flessibili.

La crescita del traffico aereo quindi comporta innovazione sia nei sistemi per la gestione operativa (*operational*) del traffico sia, non meno importante, nei sistemi per l'addestramento degli operatori (*training*).

# Capitolo 4

## Progettazione, sviluppo e valutazione di un'interfaccia 4D per l'ATC

### 4.1. Motivazione

Il previsto incremento di traffico per i prossimi anni e la crescente complessità degli scenari operativi porterà gli operatori del controllo del traffico aereo a percepire, analizzare e “fondere” una moltitudine di dati al fine di mantenere adeguati livelli di *situation awareness*.

In questo contesto, la progettazione di HMI adeguate assume un ruolo fondamentale e strategico. I livelli di *situation awareness* e di *workload* fisico e mentale sono strettamente connessi con la quantità e la qualità di informazioni ricevute e percepite dall'operatore. Tali informazioni sono fornite attraverso le HMI che devono essere progettate, sviluppate e valutate in modo accurato.

Attualmente, tutte le interfacce in uso nei centri di controllo del traffico aereo si basano su una visualizzazione bidimensionale di uno scenario che, nella realtà, è tridimensionale.

In questa tesi viene presentata un'interfaccia a quattro dimensioni [Bagassi 2008b], capace di rappresentare uno scenario di traffico aereo nelle tre dimensioni dello spazio e in quella del tempo.

## 4.2. Stato dell'arte

L'introduzione di interfacce tridimensionali e stereoscopiche in ambito operativo è stato oggetto di discussione della comunità scientifica per molti anni.

Questo tema è stato affrontato sia dal punto di vista cognitivo, sia da quello tecnologico. Il primo approccio si concentra sulla valutazione dei benefici che possono essere apportati da una visualizzazione 3D (stereoscopica) o 2.5D (monoscopica) rispetto alla classica visualizzazione 2D in termini di elaborazione delle informazioni da parte dell'operatore. Il secondo approccio, più recente, è invece focalizzato sugli aspetti tecnologici, legati alla visualizzazione ed interazione in ambienti virtuali.

Per ciò che riguarda gli aspetti cognitivi, le indagini condotte in ambito scientifico hanno portato a risultati talvolta contrastanti.

Alcuni studi condotti tra la fine degli anni ottanta e l'inizio degli anni novanta [Wickens 1989] [Wickens 1994] giudicano l'introduzione dei display 3D nel controllo del traffico aereo non vantaggiosa in termini di incremento di *situation awareness* e riduzione di carico di lavoro degli operatori.

In seguito altri studi [Brown 1994a][Brown 1994b][Burnett 1991] rivelano alcuni vantaggi per l'utilizzo di interfacce 3D (stereoscopiche) rispetto a quelle 2.5D e 2D.

Con la diffusione di tecniche di visualizzazione ed interazione in ambienti virtuali sempre più evolute, compaiono molti studi che sfruttano il progresso tecnologico al fine di creare dei prototipi dimostratori di interfacce 3D per ATC, da sottoporre al giudizio degli utenti finali, gli operatori del controllo del traffico aereo.

I principali lavori in questo ambito vengono brevemente descritti di seguito.

- [Azuma 1996] Ronald Azuma et al. (Hughes Research Laboratories, California, USA, 2000) presentano un'interfaccia interattiva per la visualizzazione di scenari ATC. La visualizzazione è stereoscopica e viene posta molta attenzione alla rappresentazione delle traiettorie e alla soluzione dei conflitti.
- [Lange 2003] [Lange 2006] Marcus Lange et al. (University of Linköping, Sweden, 2003) hanno sviluppato un'applicazione per la visualizzazione stereoscopica di scenari ATM. Questo strumento comprende funzionalità di base per la gestione dei voli e delle traiettorie, oltre che per la visualizzazione delle condizioni meteorologiche. Inoltre è prevista un'interazione di tipo multi-modale.
- [Rozzi 2006] Simone Rozzi et al. (Eurocontrol Experimental Center, France, 2006) presentano un sistema di visualizzazione tridimensionale a supporto delle valutazioni spazio-temporali (*temporal-spatial reasoning*) sviluppando due diverse applicazioni dedicate alla torre di controllo e al controllo di avvicinamento.
- [Reisman 2006] Ronald Reisman and David Brown (Nasa Ames Research Center, California, USA, 2006) presentano uno strumento per la visualizzazione di traffico di aerodromo in condizioni di scarsa visibilità basato sulla realtà aumentata.

Dall'analisi dei lavori sopra-descritta e da ricerche bibliografiche emerge che gli studi più recenti (dal 2000 in poi) riguardo all'introduzione di visualizzazioni 3D stereoscopiche nel controllo del traffico aereo dimostrano maggiori vantaggi rispetto ai precedenti.

## 4.3. Progettazione dell'interfaccia

Le HMI di moderna concezione sono costituite da tre principali sottosistemi: *display*, *control* e *decision aid*, ciascuno dedicato ad una funzione specifica. I *display* hanno la funzione di presentare all'utente (a uno qualunque dei cinque sensi – non necessariamente la vista) informazioni precedentemente trasformate da un calcolatore. I *control* sono definiti come tutti i dispositivi che vengono utilizzati dall'utente con l'intento di intervenire sull'evoluzione del sistema (per l'ATC sono le comunicazioni vocali). I dispositivi di *decision aid* presentano all'utente, in genere in un linguaggio di alto livello, informazioni elaborate al computer che supportano le attività di *decision making*.

Nella progettazione di questa interfaccia è stato seguito un approccio di tipo *user-centred*. I principali requisiti sono stati definiti durante la fase di pianificazione, avvalendosi delle informazioni collezionate attraverso un *focus group*, composto da controllori del traffico aereo con elevata esperienza.

### 4.3.1. Definizione dei requisiti

Le attività di controllo del traffico aereo si distinguono a seconda del tipo di controllo, che può essere di torre (TWR), di avvicinamento (APP) e di area (ACC).

La quantità ed il tipo di informazioni necessarie al corretto svolgimento dei compiti assegnati all'operatore è diverso in ciascun tipo di controllo.

L'interfaccia proposta si riferisce ad un contesto di TWR/APP. Confrontando i requisiti evidenziati nel *focus group* ed i risultati prodotti dagli studi analizzati in bibliografia si sono evidenziati sei requisiti critici per l'interfaccia:

- 1) la rappresentazione contemporanea di un grande numero di aeromobili con separazioni di almeno 6 NM in un'unica finestra;

- 2) la rappresentazione delle principali informazioni per ogni aeromobile (numero del volo, quota e velocità);
- 3) la rappresentazione delle condizioni meteorologiche;
- 4) la possibilità di avere una visualizzazione tridimensionale dello scenario;
- 5) la stima e la rappresentazione della posizione futura degli aeromobili;
- 6) l'identificazione e la rappresentazione dei possibili conflitti.

Nei display attualmente in uso i primi due requisiti sono soddisfatti attraverso una rappresentazione bidimensionale delle tracce radar, opportunamente modificate al calcolatore, e visualizzate come dei simboli di colore chiaro che si muovono su uno schermo a sfondo scuro. A ciascuna traccia è associata un'etichetta che indica il livello di volo dell'aeromobile, un codice identificativo ed altre informazioni aggiuntive (prua, velocità). E' possibile modificare l'ampiezza dell'area ed il *range* di livelli di volo entro i quali si vuole visualizzare il traffico presente.

Le condizioni meteorologiche vengono fornite ai controllori attraverso radar meteorologici bidimensionali o codici forniti dai servizi di informazione.

In questo tipo di rappresentazione l'operatore deve essere in grado di ricostruire una *mental picture* tridimensionale del traffico trasformando l'informazione numerica che indica il livello di volo in una forma simile ad una rappresentazione

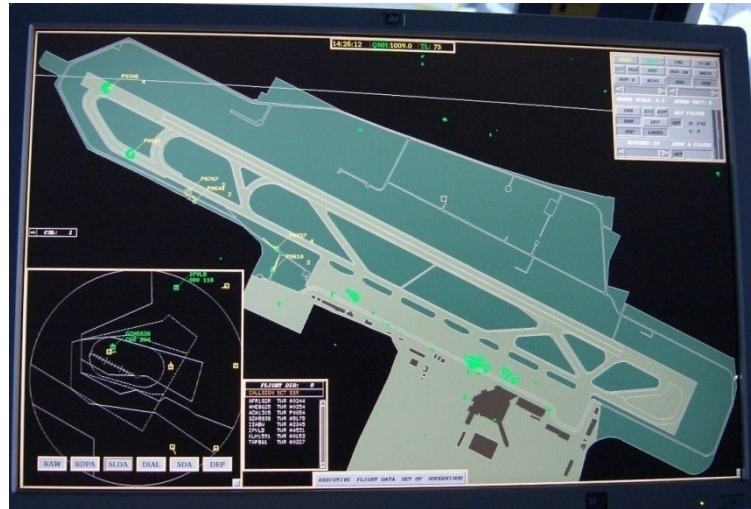


Figura 4-1. Display ground.

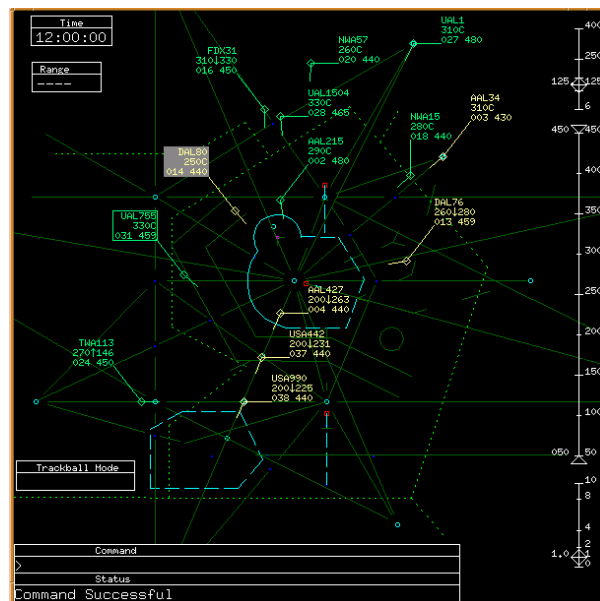


Figura 4-2. Radar APP.

grafica. Inoltre, nei display di torre e *ground*, le reali dimensioni degli aeromobili non sono percepibili. Queste interfacce quindi forniscono una rappresentazione non coerente con quello che viene visto dai controllori attraverso i vetri della torre.



Una visualizzazione tridimensionale, che rappresenti in modo più naturale ed intuitivo la posizione degli aeromobili nello spazio e li inserisca nell'ambiente circostante fornendo le informazioni relative alla navigazione, all'orografia e alle condizioni meteorologiche, potrebbe fornire agli operatori una maggiore *situation awareness* a costi minori in termini di carico di lavoro.

Integrando una rappresentazione della quarta variabile, il tempo, è possibile anche fornire informazioni riguardo all'evoluzione del traffico, identificare possibili conflitti e suggerire all'operatore strategie per la soluzione dei conflitti.

### 4.3.2. Sviluppo delle soluzioni progettuali e del prototipo di interfaccia

Il prototipo di interfaccia è necessario al fine di sperimentare nella fase di valutazione le soluzioni progettuali che vengono proposte; si realizza un prototipo di una possibile postazione di lavoro basata sull'utilizzo di un dispositivo di visualizzazione stereoscopica costruito a partire da elementi COTS. Questo dispositivo, denominato **Virtual PST** (*Passive Stereoscopic Theatre*) è costituito da uno schermo Silver D-Lite non-depolarizzante, di dimensioni 2,2 x 1,65 metri, per la proiezione frontale, una *workstation* (4GB RAM e scheda grafica NVidia FX Quadro 3400), due videoproiettori DLP<sup>TM</sup> (*Digital Light Processing*<sup>TM</sup>), filtri ed occhiali a polarizzazione lineare per applicazioni stereoscopiche.



Figura 4-3. PST Passive Stereo Theatre al laboratorio di realtà virtuale della II Facoltà di Ingegneria dell'Università di Bologna.

L'applicazione sviluppata si basa su Aliview [Boccalatte 2005], un software per l'analisi di sequenze di volo, che è stato interamente sviluppato nel laboratorio a seguito di una collaborazione con Alitalia per l'utilizzo di strumenti di computer grafica nell'analisi di *incident* e *accident* aerei.

Nella finestra principale viene visualizzata una rappresentazione tridimensionale dell'ambiente che integra l'orografia del terreno, la presenza di edifici o ostacoli rilevanti, i *waypoint* e le radio-assistenze.

Il terreno è rappresentato attraverso una *mesh* quadrangolare basata su mappe DEM (*Digital Elevation Map*) e che adotta la multi-risoluzione adattando il livello di dettaglio LOD (*Level Of Detail*) della *mesh* al campo di visione FOV(*Field Of View*). Il *rendering* del terreno è ottenuto attraverso l'utilizzo di fotografie satellitari ad alta risoluzione.



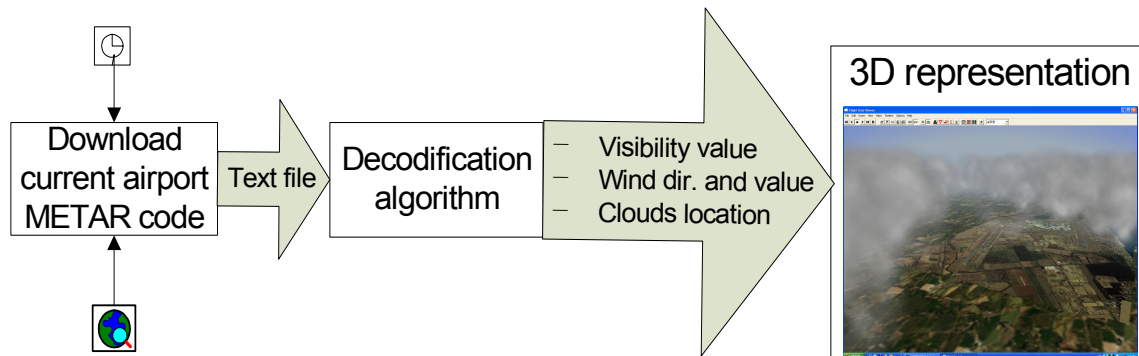


Figura 4-5. Download, decodifica e visualizzazione dei dati meteorologici

Per la rappresentazione degli aeromobili viene adottata una soluzione che si basa sul concetto di **multi-risoluzione**. Gli aeromobili sono rappresentati in modi differenti a seconda della distanza a cui si trovano rispetto alla telecamera virtuale che rappresenta il punto di vista dell'operatore. L'utente può modificare la posizione della telecamera agendo sui comandi di un mouse. Se il punto di vista dell'operatore si trova vicino alla scena (la distanza  $d$  è piccola), allora l'aeromobile è rappresentato in modo fotorealistico attraverso la reale geometria comprensiva di dettagli quali flap, carrello e livree. Se invece il punto di vista dell'operatore è lontano dalla scena (la distanza  $d$  è grande), allora tutti i velivoli che appartengono al FOV vengono rappresentati come dei coni colorati il cui asse coincide con l'asse di rollio del velivolo rappresentato.

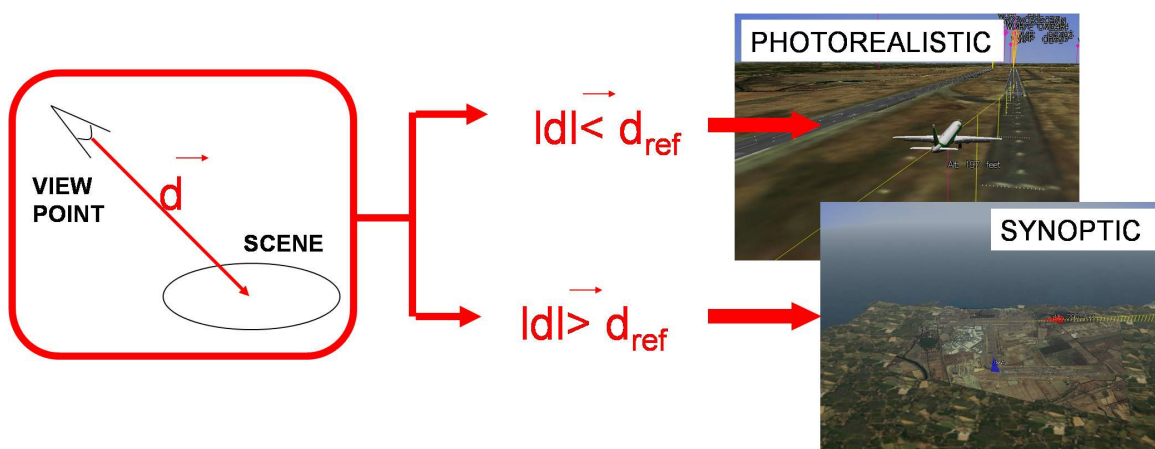


Figura 4-6. Schema rappresentativo dell'impiego della multi-risoluzione nella rappresentazione degli aeromobili

In questa configurazione, al variare della distanza della telecamera dalla scena, le dimensioni del cono restano costanti rispetto alla finestra, in particolare l'altezza del cono è il 4% della diagonale dello schermo. Il colore del cono dipende dalla fase di volo in cui si trova l'aeromobile che rappresenta ed è codificato come descritto nella tabella 1.

CONDITION	COLOUR
APPROACHING-LANDING	RED
TAXI	BLUE
TAKE OFF-DEPARTING	GREEN
TRANSIT	WHITE

Tabella 1. Convenzione adottata per la corrispondenza tra colore del cono e fase di volo del velivolo rappresentato

La rappresentazione fotorealistica si trasforma in quella sinottica all'aumentare della distanza tra la scena ed il punto di vista dell'utente. Questo tipo di soluzione è preferibile al semplice ingrandimento della geometria reale del velivolo, come proposto da Lange et al. [Lange 2003] [Lange 2006], poiché

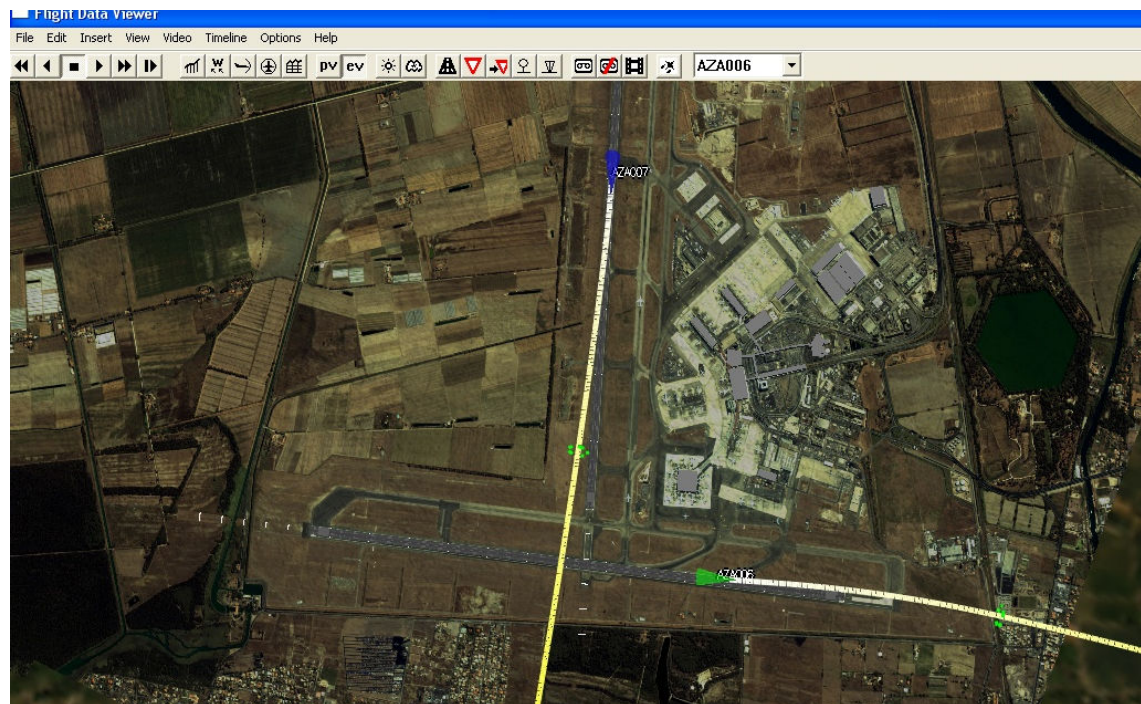


Figura 4-7. *Screen-shot* dell'applicazione *operational* nella condizione in cui gli aeromobili vengono rappresentati sinotticamente attraverso i coni.



permette all'operatore, qualora ne senta la necessità, di vedere l'aeromobile nelle sue vere dimensioni.

Inoltre a ciascun aeromobile è associata una etichetta, che riporta l'identificativo dell'aeromobile o del volo, la quota e la velocità.

Il requisito di rappresentazione della variabile tempo ha portato allo sviluppo di un algoritmo per la predizione delle traiettorie. L'algoritmo utilizza metodi geometrici e matematici al fine di prevedere la posizione futura dei velivoli fino a 10 minuti ed è composto da due passi: l'assegnazione di traiettoria (*pattern recognition*) e la predizione nel tempo (*prediction*).

L'assegnazione di traiettoria si avvale degli stati del velivolo (posizione, heading, velocità) confrontati con un database di rotte standard (STAR e SID) scritto in un opportuno formato. Il database comprende N possibili rotte standard ciascuna composta da M tratti (segmenti) consecutivi. I segmenti sono descritti da vettori tra due punti che possono essere *waypoint*, VOR o NDB.

Per ogni velivolo appartenente alla scena, il *true heading* ( $h_a$ ) viene confrontato con gli *heading* ( $h_{lj}$ ) dei segmenti orientati costituenti il DB; tra questi vengono selezionati i  $k$  vettori per cui è verificata l'equazione (4.1)

$$|h_a - h_{lj}| \leq 5 \text{ deg} \quad (4.1)$$

Successivamente, tra i  $k$  vettori selezionati quello che si trova “più vicino” all'aeromobile viene selezionato ed assegnato all'aeromobile stesso. La selezione viene fatta attraverso un metodo geometrico descritto in figura.

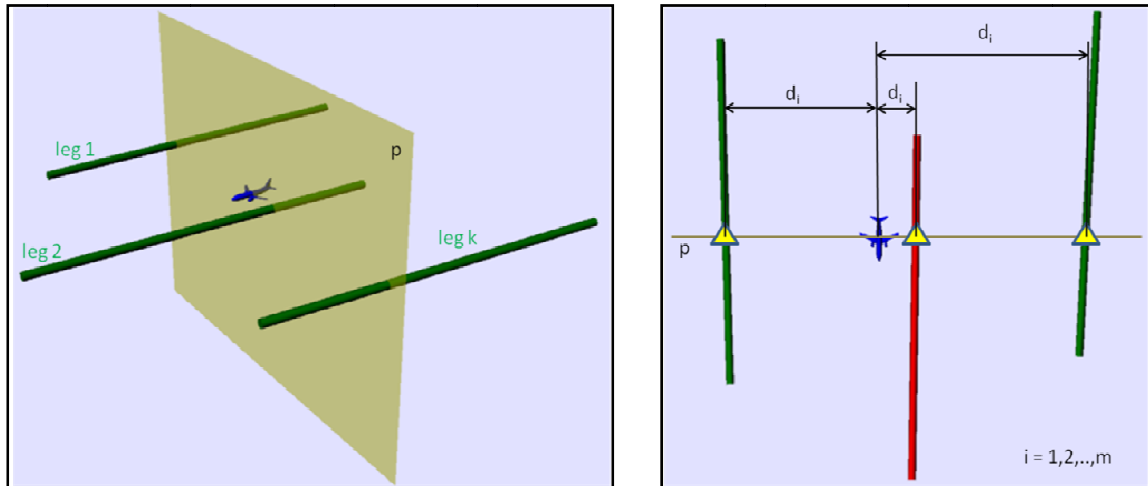


Figura 4-8. Il metodo geometrico utilizzato nell'algoritmo di *path recognition*.

Viene tracciato un piano verticale  $p$ , perpendicolare alla direzione di true heading e centrato nel baricentro dell'aeromobile. Il piano  $p$  interseca i  $k$  vettori in altrettanti punti. Se la distanza  $d_i$  tra l' $i$ -esimo punto (ovvero il punto in cui il piano interseca l' $i$ -esimo vettore) e il baricentro dell'aeromobile è minore di 600 piedi allora l' $i$ -esimo vettore viene associato all'aeromobile. Il passo successivo assegna il vettore ad una rotta, utilizzando un metodo diverso a seconda che si tratti di voli in arrivo o in partenza. Infatti le rotte in partenza sono “divergenti”, mentre quelle in arrivo sono, fatta eccezione per alcuni tratti in atterraggio sugli aeroporti con più di una pista, “convergenti”; quindi nei voli in arrivo l'assegnazione della rotta viene fatta sulla base della pista prevista per l'atterraggio, mentre nei voli in partenza viene utilizzata la destinazione finale.

Una volta che la rotta è stata assegnata al velivolo inizia la fase di predizione. La posizione del velivolo al tempo  $t$  viene ottenuta integrando nel tempo  $dt$  la velocità del velivolo all'istante di osservazione lungo la traiettoria assegnata.

I risultati dell'algoritmo di predizione vengono visualizzati attraverso due rappresentazioni alternative.

La prima, denominata *colour-coded time*, prevede che la variabile tempo sia rappresentata tramite variazioni di colore lungo la traiettoria del velivolo.

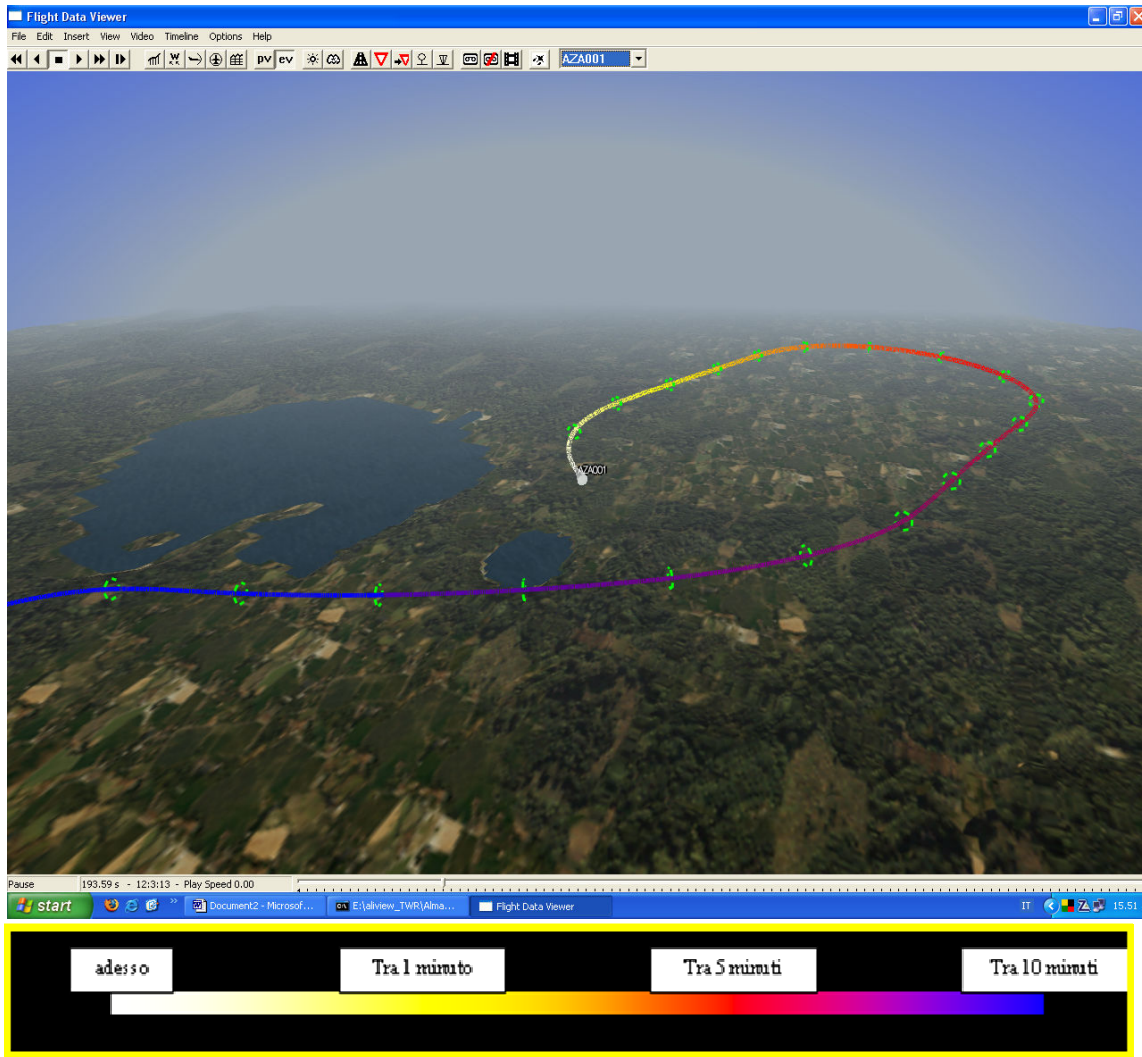


Figura 4-9. *Screen-shot* della rappresentazione *colour-coded time* e schema delle convenzioni adottate per la corrispondenza tempo-colore. I punti di colore giallo appartenenti alla traiettoria sono quelli in cui il velivolo si troverà tra 1 minuto, quelli rossi tra 5 minuti e quelli blu tra 10.

La seconda invece, denominata come *prediction line*, rappresenta la traiettoria futura dell'aeromobile, fino al tempo  $t$ , come un linea la cui lunghezza dipende dall'intervallo di predizione stabilito dall'utente. L'operatore modifica l'intervallo di predizione, fino a 10 minuti, attraverso un cursore che scorre su una *time-bar*.

Inoltre per entrambe le soluzioni proposte viene inserito un sistema di identificazione delle possibili zone di conflitto; nel primo caso le zone di conflitto



vengono automaticamente identificate dall'operatore come quei punti in cui le traiettorie che si intersecano assumono la stessa gradazione di colore; nel secondo caso i dati provenienti dall'algoritmo di predizione vengono elaborati al fine di calcolare la distanza relativa tra i velivoli. Se si presenta un conflitto (due velivoli con separazioni sotto le minime), la zona di conflitto viene evidenziata sullo schermo con un cerchio rosso.



Figura 4-10a. Screen-shot della rappresentazione tramite prediction line di un conflitto tra due aeromobili; b. Time-bar per l'interazione con la variabile tempo

## 4.4. Valutazione

Il processo di validazione di interfacce innovative deve essere condotto anche attraverso una fase di valutazione. Esistono diverse tecniche che possono essere utilizzate al fine di valutare la progettazione di un'interfaccia. Esse utilizzano strumenti derivanti da aree di ricerca differenti come la psicologia cognitiva, l'ergonomia, la statistica e l'ingegneria di sistema. Le tecniche di valutazione possono essere classificate sulla base del numero di soggetti giudici coinvolti (*single*, *focus group*, campioni statistici) o sulla base del tipo di metriche adottate (qualitative o quantitative). Come nella maggior parte dei contesti *safety-critical*, nell'ATC il principale obiettivo della valutazione di HMI è la misura della *Situation Awareness* SA e del carico di lavoro fisico e mentale dell'operatore

derivante dall'impiego dell'interfaccia progettata. In bibliografia è possibile trovare numerosi esempi di metriche e test utilizzati per misurare la SA e il carico di lavoro come ad esempio Nasa TLX [Hart], SAGAT [Endsley 2000] e SASHA (Eurocontrol).

Gli operatori del controllo del traffico aereo sono stati coinvolti in tutte le fasi della progettazione dell'interfaccia. Nella fase di valutazione è stato chiesto a 9 controllori esperti di osservare individualmente una sequenza di dieci minuti di traffico su un aeroporto rappresentata attraverso l'interfaccia. Al termine di questa sessione, i controllori hanno risposto ad un breve questionario (vd appendice).

Lo scenario modellato per la fase di valutazione rappresenta l'aeroporto internazionale di Roma-Fiumicino e parte dell'area di APP circostante. Tutte le piste (3 principali + 1 ausiliaria) ed i principali edifici sono stati modellati, al fine di migliorare le caratteristiche di fotorealismo dell'interfaccia. Inoltre i *waypoint* ed i VOR vengono rappresentati attraverso simboli 3D.

La sequenza prevede dieci aeromobili presenti contemporaneamente ed il rischio di conflitto a  $t = 8$  min tra due aeromobili che arrivano ad una separazione minima di 1 NM.

La campagna di valutazione è stata ripetuta due volte, coinvolgendo soggetti diversi: nella prima valutazione il prototipo adottava la tecnica *colour-coded time* per la rappresentazione della variabile tempo; nella seconda invece era implementata la tecnica *prediction-line*.

Il questionario proposto (Appendice B) è composto da 20 domande a risposta chiusa su una scala di 4 o 5 livelli ed è stato realizzato seguendo i principi di Likert per le domande soggettive. Esso è suddiviso in tre parti, riguardanti i tre aspetti principali dell'interfaccia proposta:

- l'introduzione di un rappresentazione 3D stereoscopica, compresi gli aspetti legati alle rappresentazioni foto realistiche;

- la rappresentazione degli aeromobili secondo l'approccio multi-risoluzione;
- la predizione della traiettoria e l'individuazione dei conflitti.

Nella fase di definizione dei requisiti erano stati evidenziati alcuni *task* definiti dagli operatori come critici. Nella fase di valutazione questi *task* vengono ripresi e, per ciascuno di essi, sono presenti nel questionario due domande: la prima (*feasibility*) riguarda la possibilità di portare a termine il *task*, nella seconda (*usefulness*) si chiede di giudicare l'utilità della rappresentazione proposta al fine di compiere il *task*.

I risultati dei questionari sono presentati sotto forma di istogrammi che raggruppano i giudizi medi degli operatori nelle tre aree di indagine e per le due campagne di valutazione.

Per la prima campagna di valutazioni:

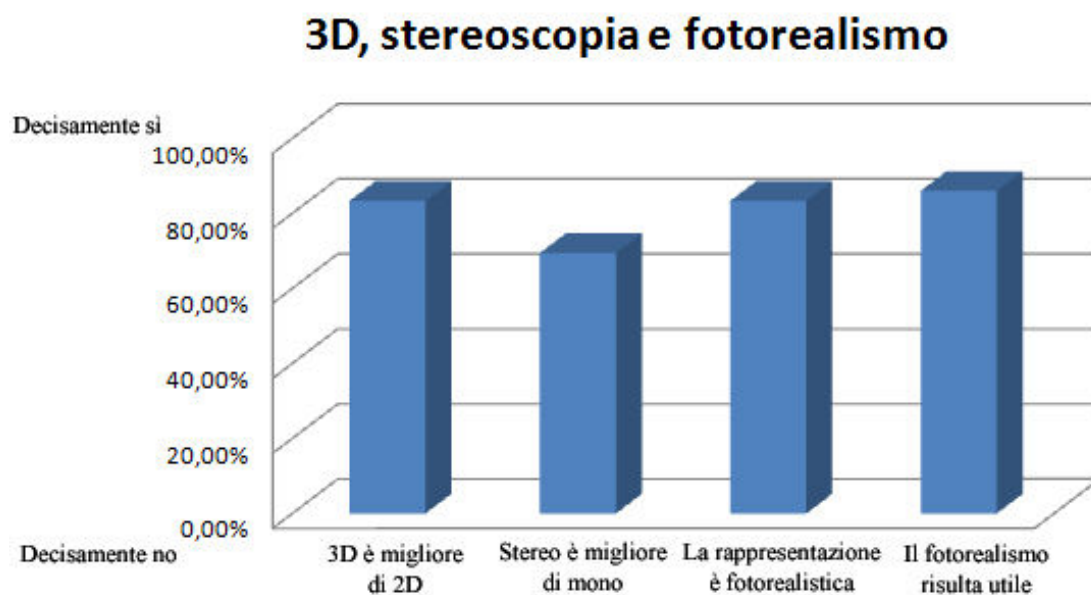


Figura 4-11. Risultati della prima campagna di valutazione riguardanti gli aspetti di 3D, stereoscopia e fotorealismo dell'interfaccia

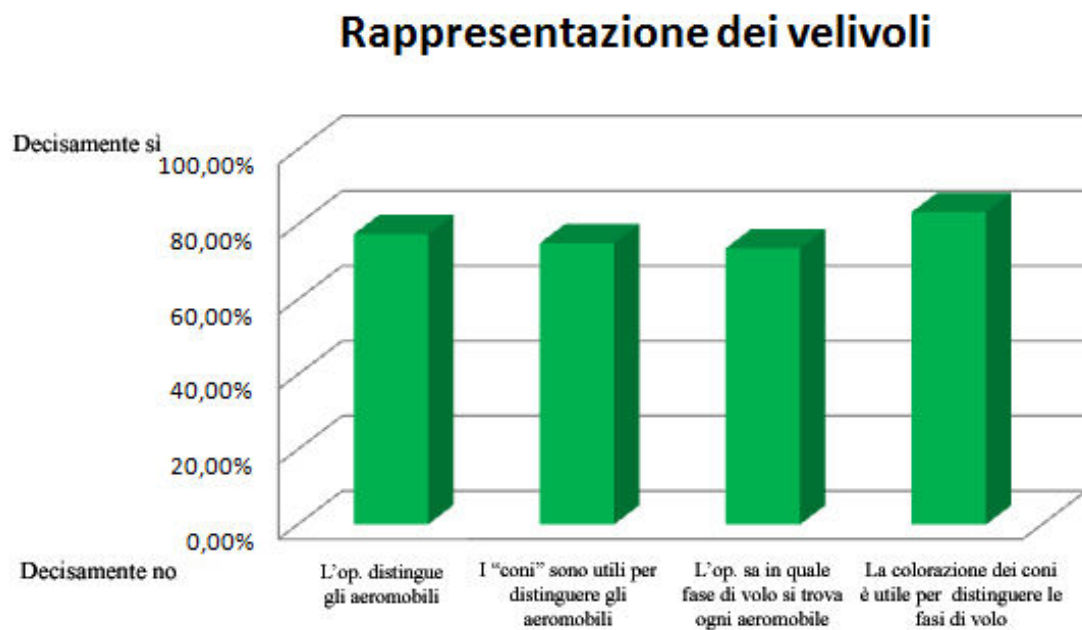


Figura 4-12. Risultati della prima campagna di valutazione riguardanti la rappresentazione sinottica, attraverso coni colorati, dei velivoli.

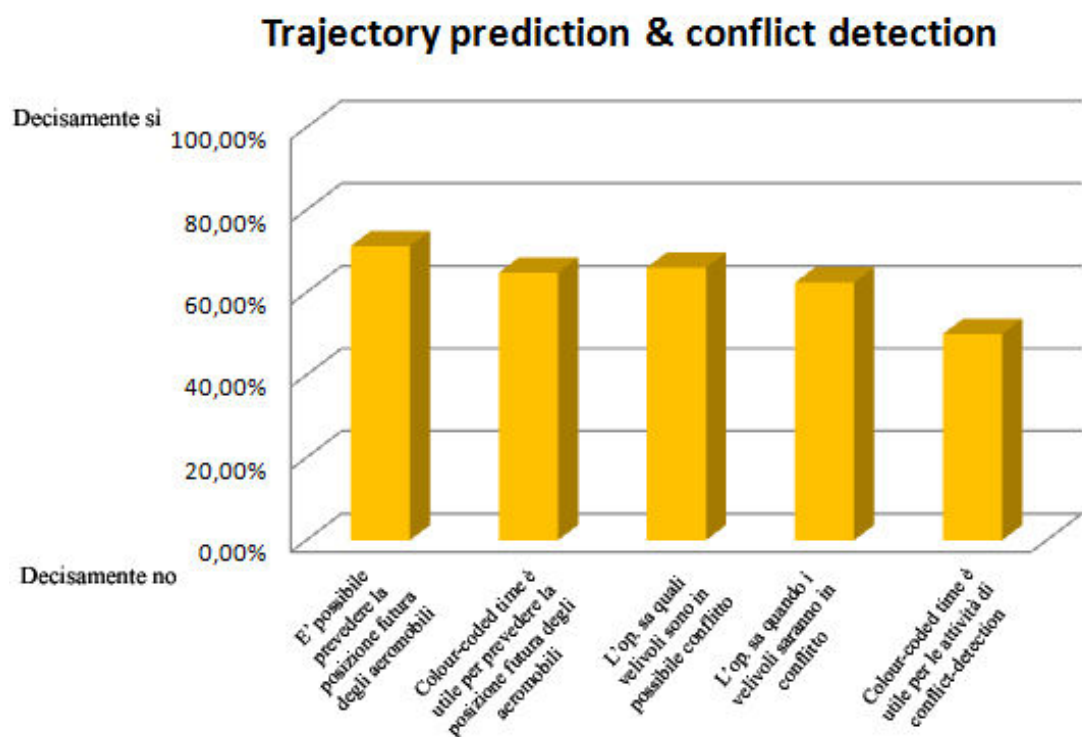


Figura 4-13. Risultati della prima campagna di valutazione riguardanti l'efficacia della soluzione *colour-coded time* per le attività di *trajectory prediction* e *conflict detection*.

Per la seconda campagna di valutazioni:

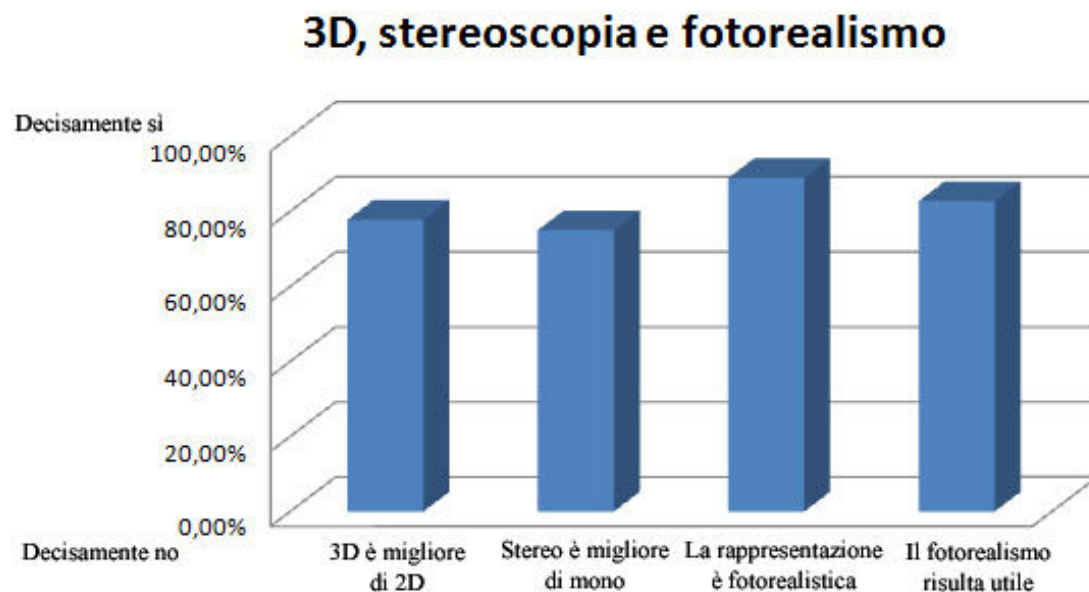


Figura 4-14. Risultati della seconda campagna di valutazione riguardanti gli aspetti di 3D, stereoscopia e fotorealismo dell'interfaccia.

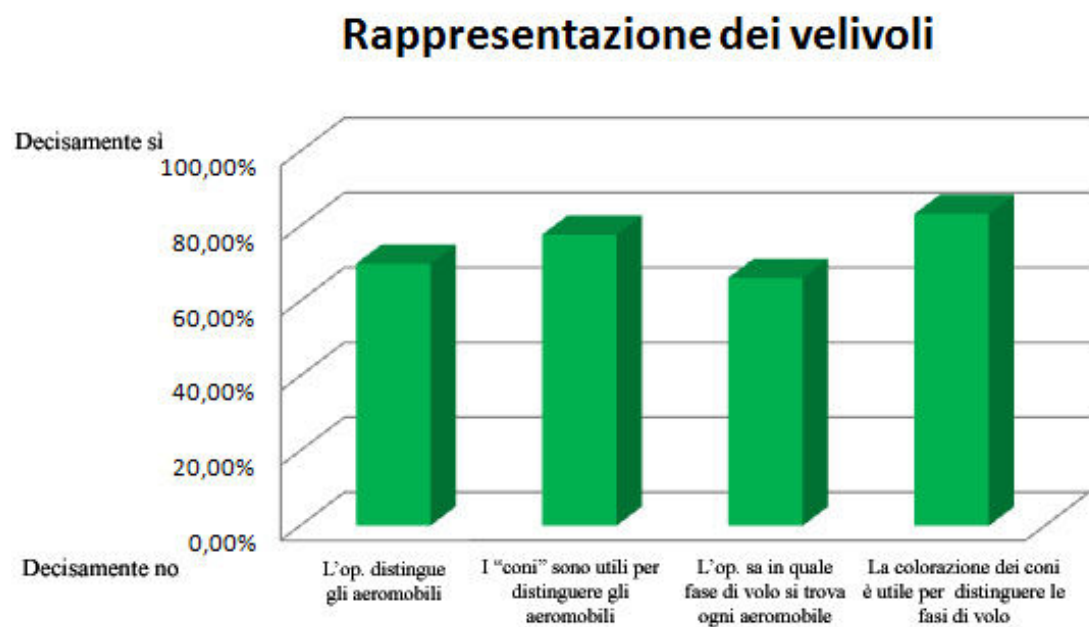


Figura 4-15. Risultati della seconda campagna di valutazione riguardanti la rappresentazione sinottica, attraverso coni colorati, dei velivoli.

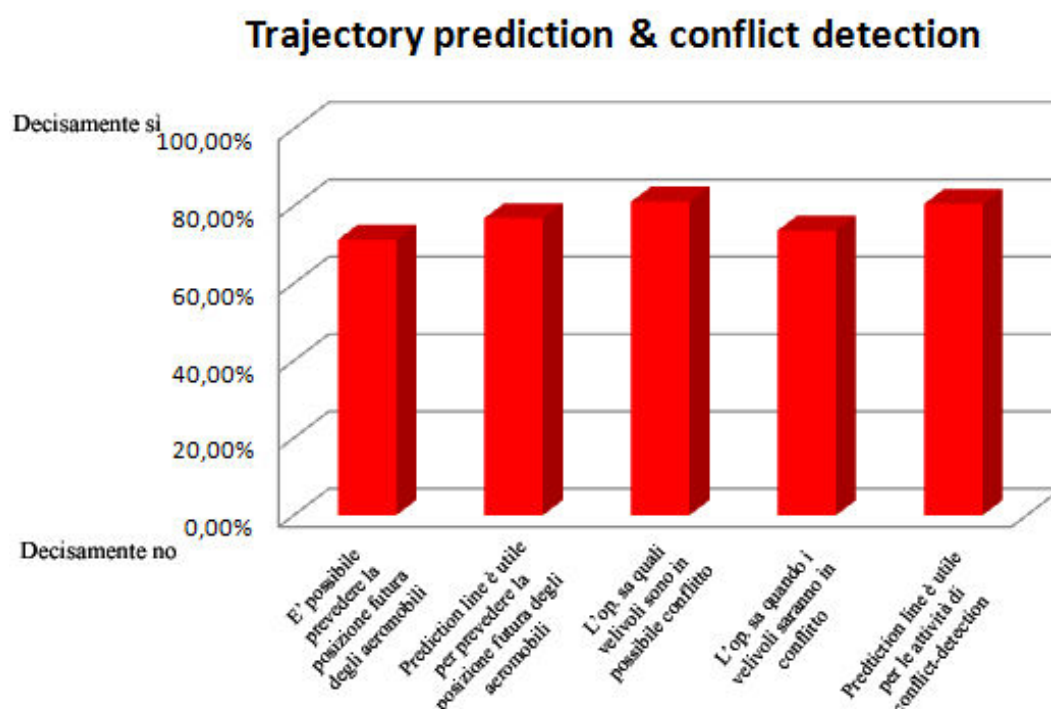


Figura 4-16. Risultati della seconda campagna di valutazione riguardanti l'efficacia della soluzione *prediction-line* per le attività di *trajectory prediction* e *conflict detection*.

I giudizi espresso dai controllori intervistati risultano complessivamente positivi in tutti gli ambiti di interesse evidenziati e in entrambe le campagne di valutazione.

Occorre notare il giudizio molto positivo espresso, sia nella prima che nella seconda campagna di valutazione, nei confronti della prima area esaminata (3D, stereoscopia e fotorealismo). Questo risultato è infatti confrontabile con i risultati forniti da altri studi presenti in bibliografia; esso è in linea con gli studi più recenti mentre contrasta con i risultati degli studi più vecchi. La ragione di queste differenze è da ricercare nella maturità raggiunta dalla realtà virtuale attraverso i recenti progressi fatti nelle tecniche di stereoscopia e computer grafica.

L'introduzione dei coni colorati risulta utile nell'esecuzione di due *task*: il distinguere gli aeromobili e l'identificazione della fase di volo in cui si trova ogni aeromobile. A tal riguardo è bene notare che alcuni dei controllori intervistati hanno espresso la necessità di ridurre il numero di colori per i coni da 4 a 3,

assegnando lo stesso colore agli aeromobili in taxi ed a quelli in transito, facilmente distinguibili poiché a quote molto differenti.

Infine, dal confronto dei risultati ottenuti nella prima e nella seconda campagna è evidente come l'adozione di *prediction line* fornisca risultati migliori rispetto a *colour-coded time*. La presenza di molti colori, infatti, risulta essere causa di confusione. Inoltre l'associazione colore-tempo, secondo la convenzione introdotta, richiederebbe un breve periodo di addestramento.

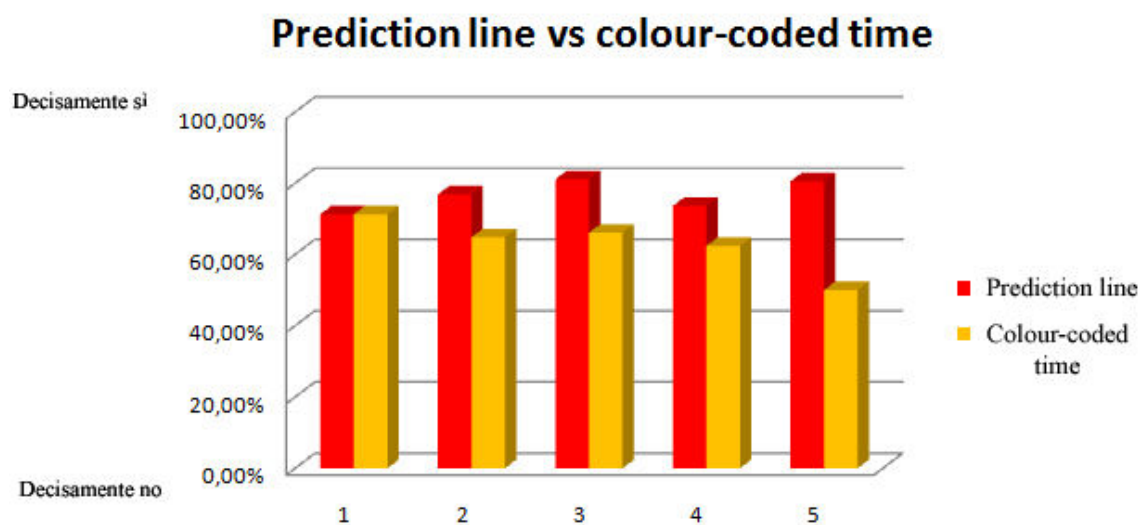


Figura 4-17. Confronto tra i dati ottenuti nella prima campagna relativamente all'impiego di *colour-coded time* (in giallo) e quelli ottenuti nella seconda campagna con *prediction line* (in rosso).





# Capitolo 5

## Sviluppo di uno strumento innovativo per l'addestramento degli operatori ATC

### 5.1. Le attività di addestramento

Le attività di addestramento sono generalmente classificate in tre classi: teorico, procedurale e pratico.

L'addestramento teorico fornisce conoscenze relativamente ai principi, le regole e gli standard che caratterizzano l'ambiente con cui l'operatore dovrà interagire. L'addestramento procedurale invece prevede che l'allievo familiarizzi con le procedure tipiche delle attività che dovrà svolgere. Infine, nell'addestramento pratico vengono acquisite e consolidate le competenze di tipo operativo attraverso la pratica sul campo o in un simulatore.

Gli strumenti di simulazione sono utilizzati sia nell'addestramento procedurale sia in quello pratico ed il loro utilizzo si è dimostrato particolarmente utile in settori “*time and safety critical*” quali il campo militare, aeronautico o chirurgico.

Nel settore aeronautico, ad esempio, l'adozione dei simulatori di volo per l'addestramento dei piloti ha portato a grandi vantaggi in termini di efficacia dell'addestramento e di riduzione di tempi e costi. Inoltre, quando le attività oggetto dell'addestramento sono di tipo collaborativo, si utilizza un addestramento pratico di tipo collettivo (*collective operative training*).

In accordo con le definizioni utilizzate in campo militare, è possibile considerare un altro livello di addestramento, l'addestramento alla missione (*mission training*), in cui vengono coinvolti più partecipanti ciascuno avente un preciso ruolo. Dal momento che il coinvolgimento di un allievo in una missione reale potrebbe generare situazioni critiche, l'addestramento alla missione è da considerare una pratica costosa e rischiosa.

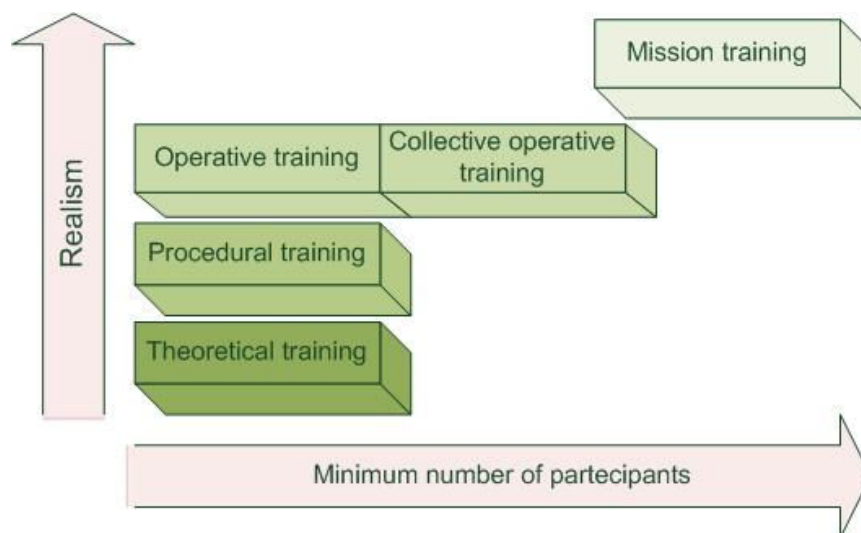


Figura 5-1. Schema delle attività di addestramento con classificazione in base a numero minimo di partecipanti e grado di realismo.

L'introduzione del concetto di simulazione distribuita permette l'addestramento alla missione in un ambiente simulato.

Nel controllo del traffico aereo gli strumenti e le procedure di addestramento per gli operatori si stanno evolvendo verso concetti sempre più innovativi, al fine di mantenere alti livelli di efficienza e *safety* anche nelle condizioni di traffico previste per il futuro.

All'interno dei più moderni centri di addestramento troviamo simulatori di torre, simulatori radar e simulatori di volo in cui tutte le fasi caratterizzanti il processo di controllo del traffico aereo (inclusa la condizione di pilota) vengono simulate con alti livelli di realismo. I sistemi di simulazione attualmente diffusi sono in grado di fornire agli allievi, con un elevato grado di realismo, la visualizzazione del paesaggio, il funzionamento del sistema e dei suoi strumenti e sensazioni molto vicine a quelle percepite nel sistema reale.

All'interno di un simulatore l'operatore acquisisce dunque le capacità relative al controllo e alla gestione del sistema attraverso la riproduzione a terra dell'interfaccia uomo-macchina. Un singolo simulatore non è però in grado di trasferire all'allievo le sensazioni relative alla presenza degli altri sistemi in evoluzione che fanno parte di uno scenario vero.

Nei più avanzati simulatori di torre, ad esempio, tali sistemi vengono semplificati al fine di popolare l'ambiente e rendere la simulazione verosimile: gli aeromobili, pilotati dai cosiddetti pseudo-piloti, sono impiegati per animare lo spazio aereo e fornire scenari esercitativi per la formazione dei controllori di volo.

Rimane comunque viva l'esigenza di trasferire all'operatore le esperienze relative all'impiego del singolo sistema in una situazione reale, nella quale altri soggetti possono interagire con quello che si sta simulando.

Queste considerazioni hanno dato avvio al concetto di interoperabilità dei sistemi di simulazione (vedi paragrafo 2.4.2).

Applicare questo principio significa integrare più simulatori in grado di emulare uno scenario operativo completo realizzando così un "Sistema dei Sistemi".

La simulazione diventa quindi "distribuita": numerosi attori, operanti in settori differenti, operano in uno stesso scenario trasferendosi vicendevolmente i dati di simulazione; il dinamismo dello scenario comune è guidato dagli attori stessi, esattamente come nella realtà [De Crescenzo 2006].

## 5.2. Descrizione del sistema

L'applicazione proposta, denominata ATC *Distributed Simulation Training Tool* [Bagassi 2008a], si basa sul concetto di simulazione distribuita e comprende un simulatore di volo (*Fixed Flight Simulator* FFS), un simulatore di scenario TABO (*Tabletop At uniBO*) ed un sistema di comunicazione tra i due sottosistemi. Questo strumento si configura come un ausilio per il training dei controllori del traffico aereo nella fase di addestramento comunemente denominata come *flight familiarization* che viene tipicamente svolta in simulatori di volo.

### 5.2.1. Il simulatore di volo

Il simulatore di volo si trova all'interno di ENAV Academy, centro di addestramento nazionale per i controllori del traffico aereo, e può simulare il funzionamento di un jet bimotore e dei sottosistemi quali EFIS (*Electronic Flight Information Systems*), EICAS (*Engine Indicating and Crew Alerting System*), FMS (Flight Management System), autopilota, RTU (*Radio Tuning Unit*).

L'interfaccia è costituita dalla riproduzione del *glass cockpit* e da un sistema di visualizzazione multi-canale con un campo di visione di apertura angolare 40° x 150°. Nell'attuale addestramento dei controllori il simulatore di volo viene utilizzato al fine di far comprendere agli allievi il punto di vista del pilota su alcune problematiche relative all'ATC.

### 5.2.2. Il simulatore di scenario

Il simulatore di scenario TABO è un interfaccia stereoscopica a proiezione orizzontale, costituita da una parte HW ed una parte SW. La parte HW è stata integralmente progettata e realizzata nell'ambito di questa tesi e verrà descritta in maniera approfondita nel paragrafo 5.4. Il concetto fondamentale che sta alla base dell'originalità di questo tipo di interfaccia è la proiezione su un piano

orizzontale che si rende necessaria per questo tipo di applicazione, come alternativa alla più consueta proiezione su piano verticale, poiché la vista dall'alto costituisce un punto di vista naturale per le interfacce usate nel controllo del traffico aereo e nella navigazione. Si pensi ad esempio agli schermi radar, alle mappe per la navigazione, etc.

L'ambiente virtuale (SW) proiettato sull'interfaccia è un ambiente sintetico tridimensionale che simula uno scenario di traffico aereo e in cui l'impiego della stereoscopia enfatizza la percezione della profondità, fornendo all'utente una maggiore consapevolezza riguardo alle separazioni verticali tra i velivoli.

Il SW di visualizzazione ha le stesse funzionalità di base che caratterizzano il SW sviluppato per l'applicazione *operational* (vedi capitolo 4) pur non implementando le funzionalità aggiuntive come predizione di traiettoria e supporto nella *conflict detection*.

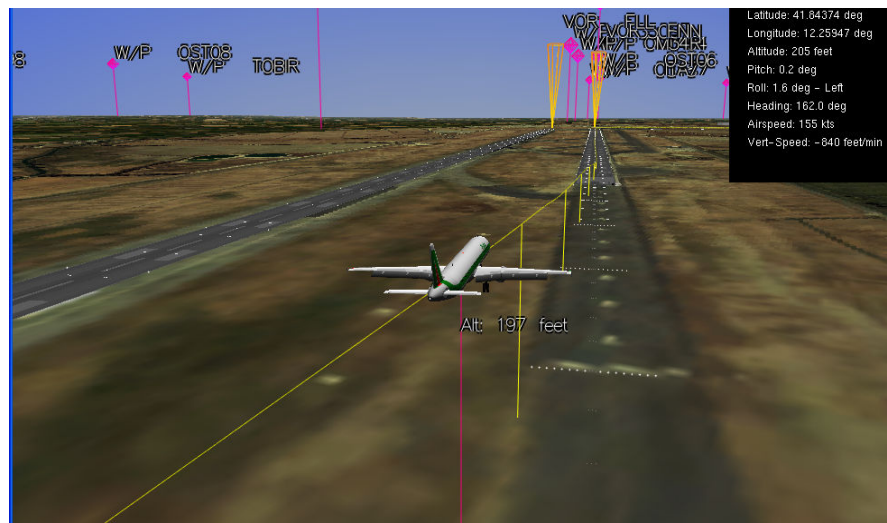


Figura 5-2. Screen-shot del SW di visualizzazione impiegato.

Inoltre, l'interazione con l'ambiente virtuale, per mezzo di mouse wireless, permette di spostare il punto di vista dell'utente da una vista di tipo “*God's eye*”, a una vista particolare su una specifica pista o su uno specifico aeromobile oltre che l'azione sullo zoom rispetto alla scena. La velocità di riproduzione della sequenza di traffico può essere controllata attraverso una barra del tempo e dei comandi *play-pause-stop-rw-fw*. Gli aeromobili che animano l'ambiente virtuale sono movimentati da dati che possono provenire da fonti differenti sia on-line che

registrate. Il sistema è capace di integrare dati provenienti da FDR (Flight Data Recorder), simulatori di volo da addestramento e modelli matematici di aeromobili (*simulink, matlab, c*).

### 5.2.3. Il sistema di comunicazione

Il sistema di comunicazione ha due canali: un canale per la comunicazione dei dati tra il simulatore di volo e il simulatore di scenario, basato su un protocollo TCP/IP in *soft real time*, ed un canale per le comunicazioni vocali tra gli operatori che si trovano sul simulatore di volo e quelli che si trovano sul simulatore di scenario. Il canale dati è in grado di trasmettere fino a 10 dati con una frequenza di 8 Hz dal simulatore di volo a quello di scenario.

## 5.3. Procedura di addestramento

La procedura di addestramento proposta prevede il coinvolgimento di almeno tre figure: un istruttore ATC (ATC TR), un pilota (PT) ed un allievo controllore (ATC TE). La sessione di addestramento è articolata in quattro fasi consecutive: *plan, brief, fly debrief*.

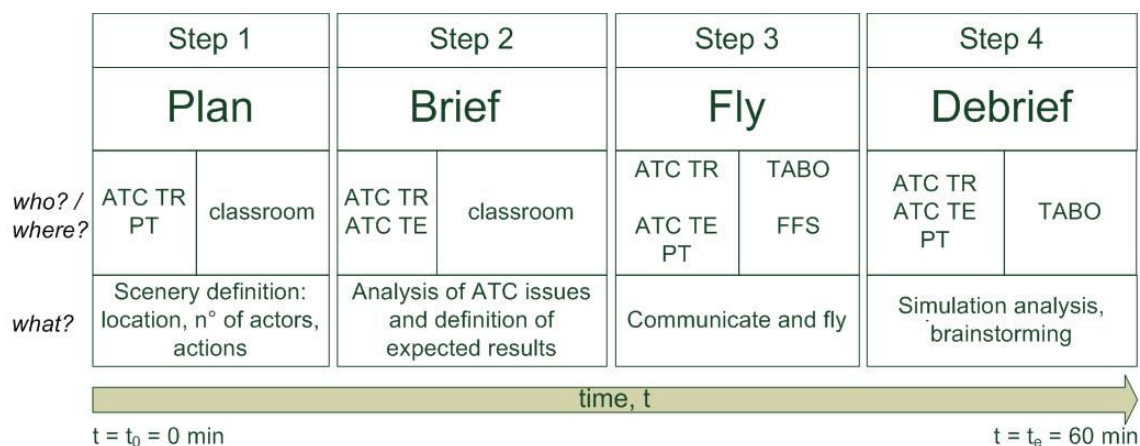


Figura 5-3. Schema delle quattro fasi costituenti la procedura di addestramento che dura circa 60 minuti.

Nella fase di *plan*, l'istruttore ed il pilota progettano lo scenario su cui svolgere l'esercizio scegliendo il luogo, il numero di attori e le azioni che ciascun attore dovrà svolgere in modo da ottenere il grado di difficoltà desiderato. In questa fase gli operatori possono decidere di selezionare l'esercizio da una lista di esercizi predefiniti, oppure di personalizzare l'esercizio in base alle esigenze specifiche dell'allievo.

Nella seconda fase, *briefing*, l'istruttore descrive all'allievo l'esercizio, evidenziando tutte le problematiche rilevanti sotto il punto di vista del controllo del traffico, come ad esempio procedure standard, condizioni critiche e fraseologia. In questa fase inoltre, vengono comunicati i risultati attesi.

Durante la fase di *fly*, il pilota e l'allievo controllore si trovano all'interno del simulatore di volo mentre l'istruttore controllore opera sul simulatore di scenario, comunicando a pilota e allievo, attraverso il canale vocale, le istruzioni in fraseologia standard. In questa fase quindi l'istruttore si comporta come se fosse un controllore che sta comunicando con i piloti di un qualsiasi velivolo. Sul sistema di visualizzazione viene rappresentato l'intero ambiente virtuale in cui un aeromobile è movimentato dai dati provenienti dal simulatore in *soft real time*, mentre tutti gli altri attori compiono percorsi predefiniti, sulla base di ciò che è stato precedentemente stabilito nella fase di *plan*.

All'interno del simulatore di volo il pilota e l'allievo controllore operano come un comandante ed un co-pilota opererebbero in condizioni reali. Terminata la fase di *fly*, in cui i due sistemi di simulazione sono connessi, il simulatore di scenario viene utilizzato in modalità *stand-alone* come strumento di *debriefing*. In questa fase, l'istruttore, il pilota e l'allievo osservano i risultati dell'esercizio, che è stato precedentemente svolto nella fase di *fly*, in termini di traiettorie realmente percorse e sincronizzazione tra comunicazioni ed azioni. Questa attività rappresenta per l'allievo un allenamento a sviluppare una "rappresentazione mentale" dello scenario ATC. La simulazione viene quindi analizzata sotto forma di moviola virtuale, con la quale è possibile interagire in modo naturale navigando nello spazio (cambiando i punti di vista) e nel tempo (agendo sulla *time-bar*).

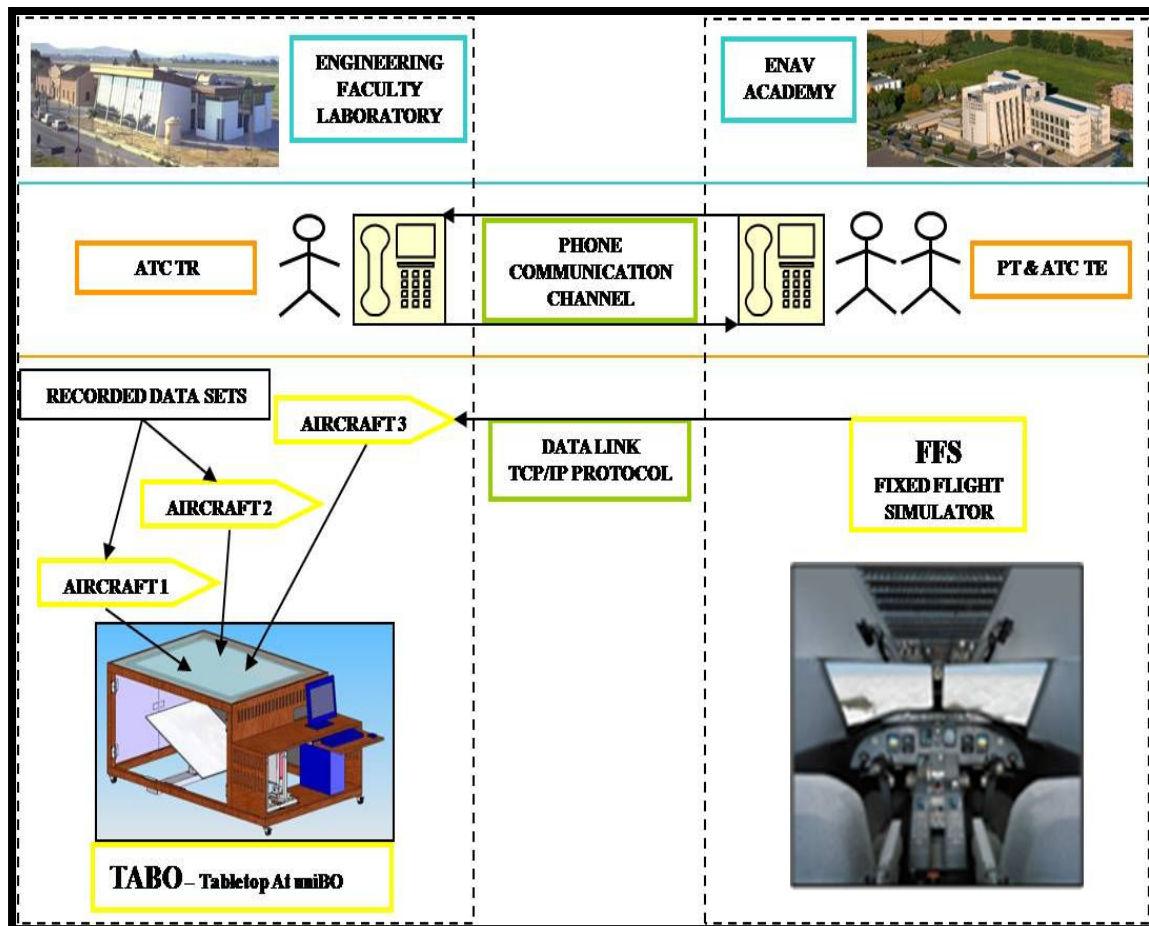


Figura 5-4. Schema della configurazione del sistema nella fase di *fly*

Rielaborando alcuni concetti tipici della pratica addestrativa militare, lo strumento proposto e la metodologia associata hanno come scopo principale quello di ridurre gli effetti negativi che possono derivare dagli *human factors*, come ad esempio le incomprensioni nelle comunicazioni terra-bordo-terra. Vengono quindi evidenziati due aspetti principali: il primo riguarda la possibilità di analizzare, attraverso questo strumento, il processo di comunicazione controllore/pilota in termini di efficacia e di sincronizzazione con le azioni; il secondo è la capacità dell'allievo di ricostruire una rappresentazione tridimensionale dello scenario di traffico, prerogativa fondamentale per una buona *situation awareness*.

Questo sistema è stato progettato adottando alcuni principi della metodologia *user-centred*, coinvolgendo gli utenti finali, istruttori ed allievi ATC, sin dalle



prime fasi del processo di progettazione. Il principale obiettivo della fase di valutazione, che sarà affrontata nel prossimo futuro, sarà la dimostrazione dei vantaggi effettivi apportati dall'impiego di questo strumento che verranno valutati attraverso metriche oggettive e questionari.

Inoltre, essendo un sistema flessibile, *ATC Distributed Simulation Training Tool* potrà accogliere altri sottosistemi al fine di migliorare la sua efficacia.

La connessione in un'unica rete interoperabile di tutte le piattaforme di simulazione impiegate nell'addestramento degli operatori ATC è un obiettivo molto ambizioso che, una volta raggiunto, porterebbe non solo ad uno strumento addestrativo completo, ma anche alla realizzazione di una piattaforma di simulazione del sistema traffico aereo, all'interno della quale sarebbe possibile sperimentare concetti innovativi per la gestione ed il controllo di tali sistemi.

## 5.4. TABO (Tabletop At uniBO)

La progettazione dell'interfaccia TABO nasce dall'esigenza di disporre di uno strumento di visualizzazione per ambienti virtuali, con piano di proiezione orizzontale e adatto ad attività di tipo collaborativo.

Il piano di proiezione orizzontale deriva dalla necessità, comune a molti settori applicativi (oltre all'ATC abbiamo anche l'architettura, i beni culturali, la chirurgia), di avere una visione dall'alto tipo *God's eye view*.

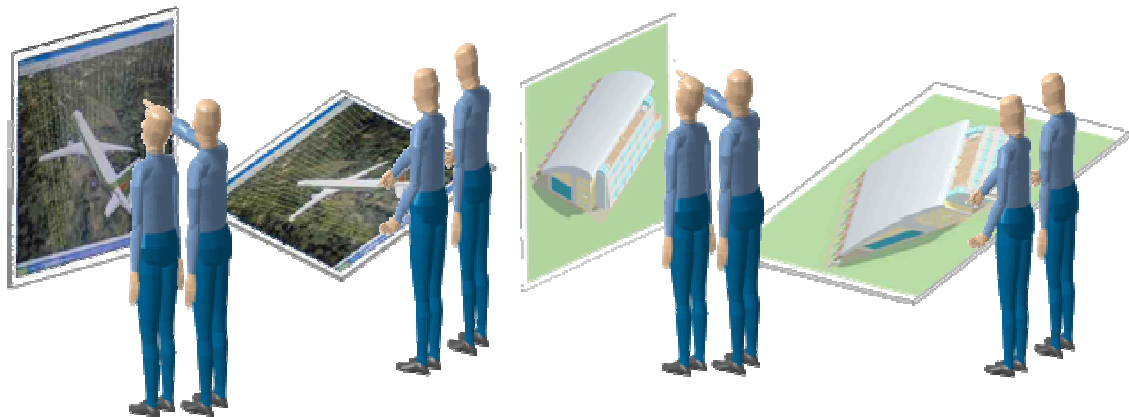


Figura 5-5. La visualizzazione dall'alto, di tipo “God’s eye view”, risulta più efficace, rispetto a quella frontale, in alcuni settori specifici come l’ATC o l’architettura.

La necessità di rispondere a questi requisiti, ha portato allo sviluppo, da parte di ricercatori ed industrie, di alcuni dispositivi di realtà virtuale con proiezione su piano orizzontale e dimensioni paragonabili a quelle di un tavolo da lavoro, che, per analogia con il “tavolo” attorno al quale si riuniscono le persone per analizzare dati e prendere decisioni, vengono comunemente denominati *tabletop*.

### 5.4.1. Stato dell'arte

Lo stato dell'arte su tali dispositivi spazia dai prodotti commerciali già consolidati sul mercato ai prototipi da ricerca.

E' possibile classificare i tavoli virtuali o *tabletop* in base a tre parametri:

- numero massimo di utenti;
- dimensioni dell'area di proiezione;
- tipo di tecnica utilizzata per la stereoscopia.

Il numero massimo di utenti dipende dalle dimensioni del tavolo e dal tipo di tecnica impiegata per ottenere l'effetto stereoscopico, in quanto essa influisce sul numero massimo di lati del tavolo da cui è possibile ottenere l'effetto stereoscopico.

Le dimensioni dell'area di proiezione dipendono dal dimensionamento del sistema ed in particolare dalla lunghezza del cammino ottico del fascio di luce tra il proiettore e la superficie di proiezione.

Nel diagramma sottostante compare la classificazione dei principali sistemi tabletop sulla base del massimo numero di utenti e delle dimensioni dell'area di proiezione.

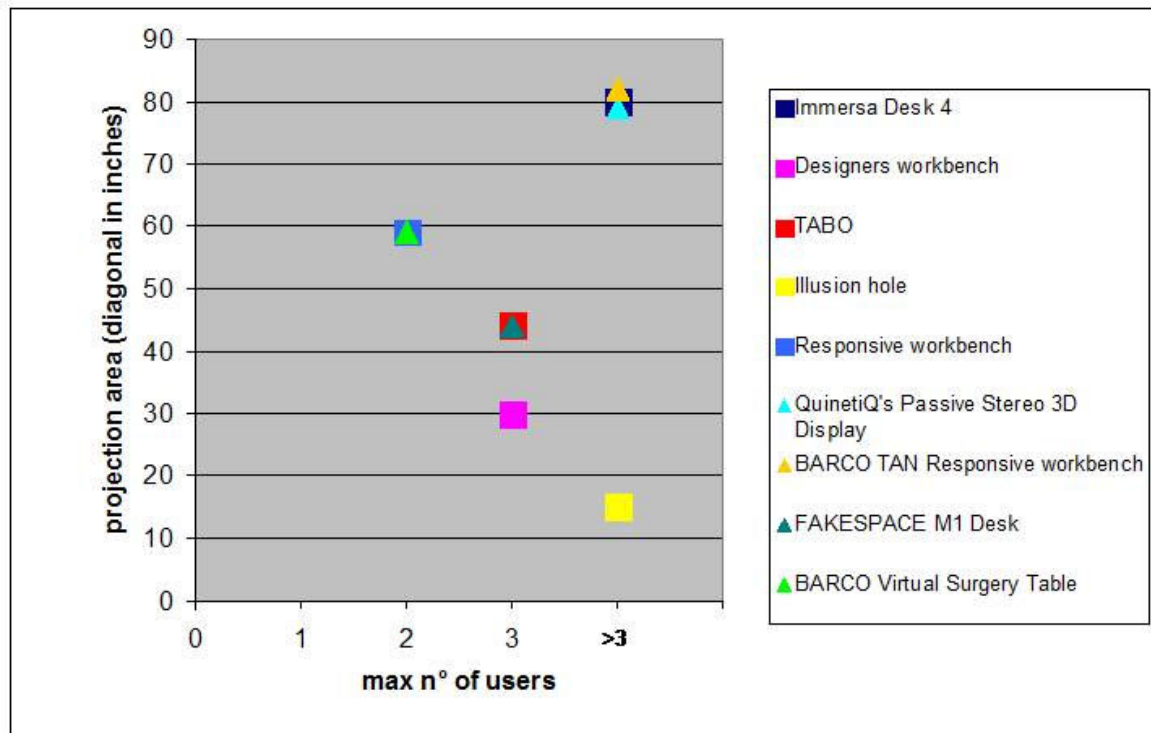


Figura 5-6. Classificazione dei prodotti tabletop stereoscopici in base ai due parametri, numero massimo di utenti e dimensioni della superficie di proiezione

Come si può osservare, TABO si colloca in prossimità del prodotto commerciale *Fakespace M1 Desk* da cui però si differenzia per il tipo di tecnica utilizzata per ottenere l'effetto stereoscopico, attiva nel prodotto *Fakespace* e passiva con polarizzazione lineare in TABO.

### 5.4.2. Descrizione del sistema

TABO è composto da una struttura di profilati in acciaio, uno schermo di proiezione rigido adatto alla retroproiezione, una *workstation* (4GB RAM e scheda grafica NVidia FX Quadro 3400), due videoproiettori DLP™ (*Digital Light Processing*™), filtri ed occhiali a polarizzazione lineare per applicazioni stereoscopiche [Persiani 2007].

Il tavolo ha le seguenti dimensioni 2.2 x 1.0 x 0.75h (metri) e la struttura accoglie i due proiettori, uno specchio di 1x1 metro ed una lastra di vetro sabbato di

dimensioni  $2.2 \times 1.0 \times 0.01h$  (metri) che svolge la duplice funzione di superficie di proiezione e piano del tavolo.

La soluzione adottata per la superficie di proiezione deriva da uno studio dedicato ed è in grado di soddisfare contemporaneamente tutti i requisiti critici per questo tipo di applicazione a fronte di un basso costo di realizzazione.

La necessità di un layout orizzontale implica l'adozione di un piano rigido come superficie di proiezione, sia per evitare deformazioni della superficie sia per poter, eventualmente, sostenere oggetti come ad esempio dispositivi per l'interazione. Di conseguenza si è deciso di analizzare le possibili combinazioni tra due materiali rigidi – vetro e plexiglass – e due trattamenti di opacizzazione – sabbiatura e levigatura.

I trattamenti di opacizzazione della superficie sono necessari per ottenere una diffusione della luce sulla superficie di proiezione che permetta di vedere l'immagine proiettata sullo schermo. Questi trattamenti, d'altra parte, possono modificare o anche annullare l'effetto di polarizzazione della luce, necessario per ottenere la visualizzazione stereoscopica.

Sono quindi stati testate le proprietà ottiche di quattro diverse lastre (vetro sabbiato, vetro levigato, plexiglass sabbiato, plexiglass levigato) ottenendo i migliori risultati per la lastra di vetro sabbiato.

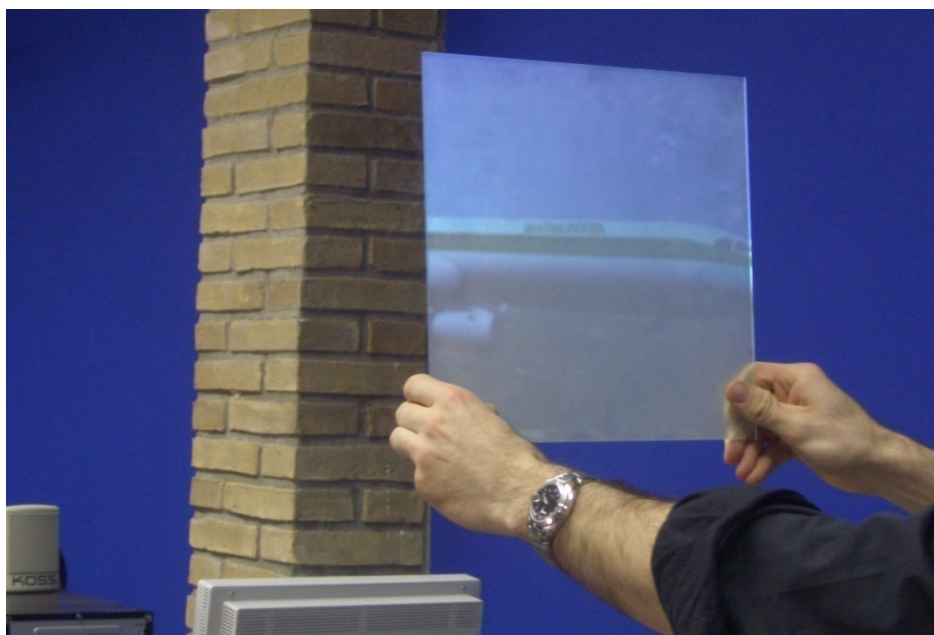


Figura 5-7. Valutazione delle proprietà ottiche, in termini di diffusione e non-depolarizzazione della luce, dei materiali analizzati

Successivamente, per questo tipo di materiale sono state valutate le combinazioni di due spessori differenti (10 e 12 mm) e due tipologie di sabbiatura (leggera-forte) ottenendo migliori risultati per la lastra di spessore 10 mm trattata con sabbiatura forte.

### 5.4.3. Progettazione del layout

La struttura accoglie tutti i sottosistemi costituenti il tabletop. Il layout è determinato sulla base di requisiti sia funzionali che estetici. Vincoli di ingombro impediscono la proiezione diretta e determinano l'inserimento di uno specchio sul cammino ottico.

L'obiettivo di ottenere un'ampia superficie di proiezione può essere perseguito aumentando la distanza tra i proiettori e lo specchio. Tale distanza è però limitata da due fattori: la risoluzione dell'immagine finale e i vincoli di ingombro. I proiettori, che utilizzano la tecnologia DLP<sup>TM</sup>, possono essere installati orizzontalmente o verticalmente.

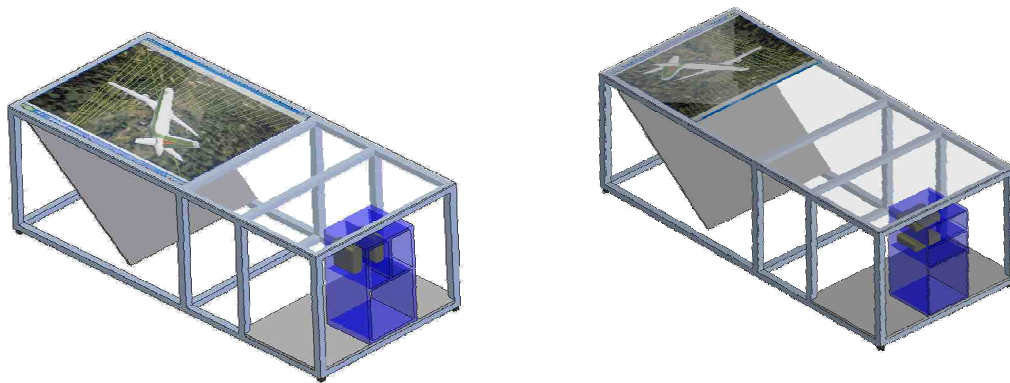


Figura 5-8. Il montaggio dei videoproiettori in verticale risulta il migliore al fine di ottenere una grande superficie di proiezione

Il montaggio verticale risulta la soluzione migliore al fine di massimizzare le dimensioni dell'area di proiezione. In questa configurazione la superficie di proiezione risulta 0.9 x 1.2 metri; ne deriva che un pixel ha le dimensioni di circa 1x1 mm sul piano di proiezione.

Come si può osservare nelle figure 5.9 e 5.10, l'orientamento dello specchio è un parametro importante. Qualunque variazione dell'angolo  $\alpha$  modifica l'intero cammino ottico del fascio di luce dei videoproiettori; ad ogni variazione di  $\alpha$  occorrerebbe quindi ri-calibrare l'intero sistema di proiezione.

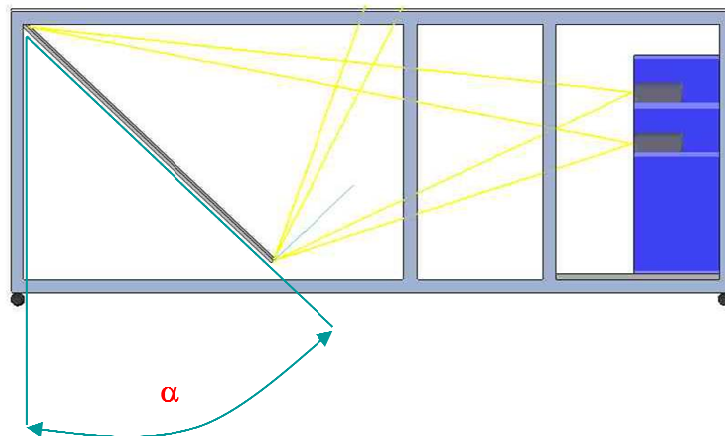


Figura 5-9. Il cammino ottico dipende dall'inclinazione  $\alpha$  dello specchio rispetto alla verticale

La condizione migliore al fine di ridurre l'utilizzo del *keystoning* dell'immagine è rappresentata dalla seguente condizione

$$A + X = B + Y \quad (5.1)$$

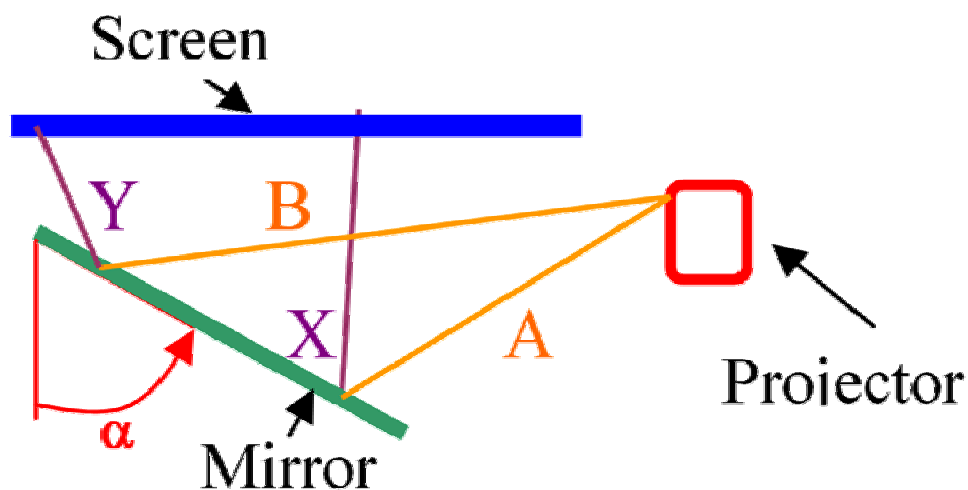


Figura 5-10. Schema di riferimento per la relazione 5.1

In pratica, il cammino ottico deve avere la stessa lunghezza per ogni fascio di luce proiettato. La relazione 5.1 non può però essere soddisfatta per i fasci di luce provenienti da entrambi i proiettori, quindi è comunque necessario utilizzare moderatamente la funzione di *keystoning* per la calibrazione del sistema. Nel dimensionamento del sistema viene adottato un angolo  $\alpha$  di  $43^\circ$  circa che permette un uso ridotto della funzione di *keystoning*.

### 5.4.4. Realizzazione

Il dispositivo è stato realizzato ed installato all'interno del laboratorio di realtà virtuale della II Facoltà di Ingegneria. L'impiego di prodotti di tipo commerciale per la parte HW (computer, videoproiettori e filtri), combinato con l'utilizzo di tecniche artigianali per la realizzazione di struttura e superfici di proiezione, permette di contenere i costi di realizzazione del primo prototipo.

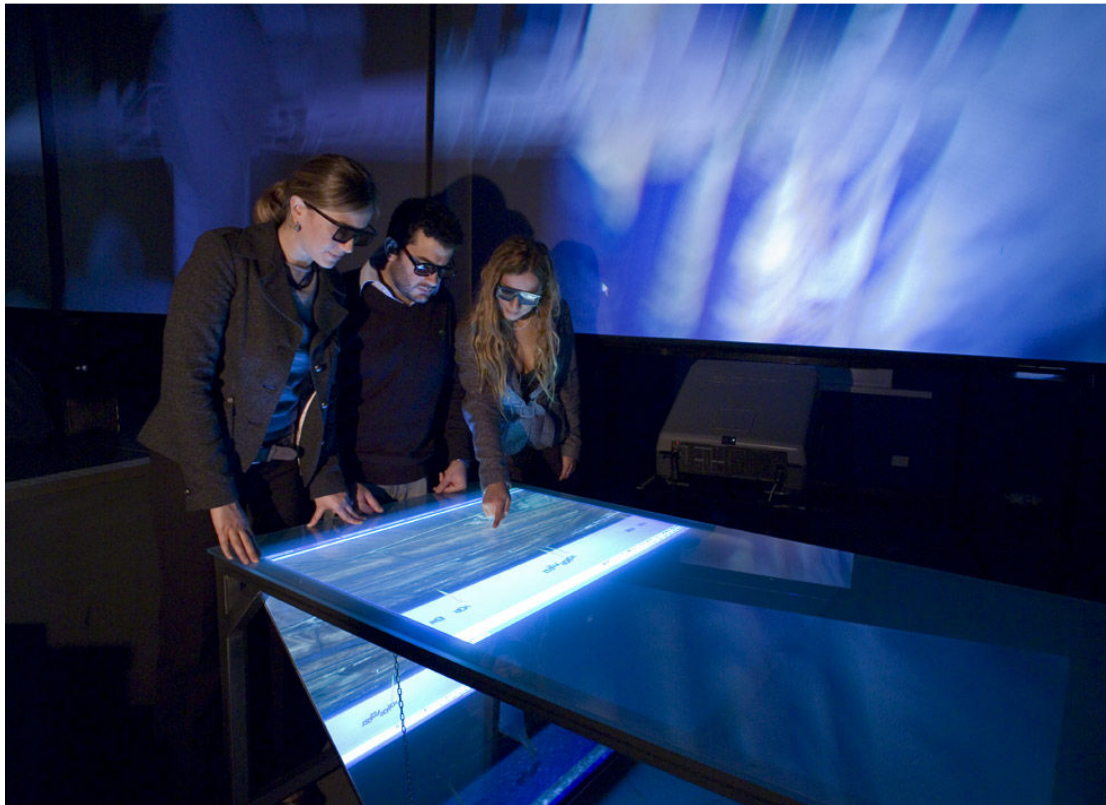


Figura 5-11. Il primo prototipo di TABO installato presso il laboratorio di realtà virtuale della II Facoltà di Ingegneria dell'Università di Bologna.

Attualmente si stanno valutando le possibili soluzioni progettuali per l'inserimento di un sistema di interazione multi-utente.



# Conclusioni

Molti dei prodotti ad alto contenuto tecnologico possono essere considerati sistemi complessi e una loro corretta progettazione prevede una particolare attenzione allo studio delle interfacce che permettono all'uomo di interagire correttamente con essi. L'utilizzo di tali sistemi prevede in alcuni casi, specialmente nei settori *safety-critical*, un lungo e costoso addestramento, la cui efficacia può essere migliorata attraverso la progettazione di sistemi interoperabili.

Le interfacce impiegate in campo operativo e nell'addestramento dovranno quindi essere sempre più inter-connesse, intelligenti e realistiche, al fine di ottenere un'interazione più naturale tra l'uomo ed il sistema, permettendo quindi all'operatore di utilizzare gli stessi meccanismi che vengono utilizzati nell'interazione con il mondo naturale. Le caratteristiche di inter-connessione, intelligenza e realismo sono tipiche dei "sistemi" con cui l'uomo è abituato ad interagire nel mondo naturale, siano essi altri individui o sistemi naturali.

Come spesso accade, anche in questo scenario il settore dell'aviazione fa da precursore. La maggior parte degli studi sulle HMI è nata dalla necessità di progettare nuovi *cockpit* aeronautici e ha fornito un'ampia bibliografia riguardante le metodologie di progettazione di questi sistemi. I concetti di *human factors*, *situation awareness*, e *mental workload* sono stati affrontati per la prima volta in questo settore.

Sebbene i primi studi relativi a queste tematiche sui *cockpit* aeronautici siano contemporanei a quelli condotti nel controllo del traffico aereo, in quest'ultimo settore lo sviluppo di interfacce innovative è stato più lento.

Attualmente, a causa della forte crescita del traffico aereo mondiale e della necessità di gestire sistemi sempre più complessi (gli aeromobili), lo sviluppo di interfacce innovative per il controllo del traffico aereo rappresenta un tema di grande interesse.

In questa tesi la tematica viene affrontata in relazione a due settori, operativo e di addestramento. In ambito *operational* si propone un'interfaccia che mira a soddisfare i requisiti degli operatori attraverso l'incremento del livello di intelligenza e del grado di realismo, mentre in ambito *training* il concetto di interoperabilità e connessione viene maggiormente enfatizzato.

L'introduzione della rappresentazione delle tre dimensioni e del tempo si avvale dei più moderni strumenti di computer grafica e realtà virtuale, fornendo risultati molto positivi in termini di realismo dell'ambiente virtuale, così come descritto nella discussione dei giudizi espressi dagli operatori coinvolti nella fase di valutazione.

Questo costituisce uno dei risultati più originali di questa ricerca, in quanto contrasta con alcuni studi, perlopiù anteriori al 2000, nei quali viene sostenuta la tesi della non adeguatezza delle rappresentazioni tridimensionali stereoscopiche per le interfacce dedicate al controllo del traffico aereo.

Le ragioni dell'incoerenza tra i risultati esposti in quegli studi ed i risultati prodotti in questa tesi ed in altre recenti indagini sono da ricercare nella maggiore maturità delle tecnologie di realtà virtuale e computer grafica, il cui impiego permette di ottenere rappresentazioni più realistiche.

# Appendice A - Lista degli acronimi e delle abbreviazioni

4D	<i>4 –dimensionale: le tre dimensioni dello spazio (3D) e il tempo</i>
AAAVTAG	<i>Azienda Autonoma di Assistenza al Volo e per il Traffico Aereo Generale</i>
ACC	<i>Area Control Center</i>
ADR	<i>rotta a servizio consultivo</i>
ADS	<i>Servizio consultivo</i>
AFIS	<i>Aerodrome Flight Information Service</i>
AIP	<i>Aeronautical Information Publication</i>
ALS	<i>Servizio d'allarme</i>
ANN	<i>Artificial Neural Network</i>
APP	<i>Approach Control</i>
ATC	<i>Air Traffic Control</i>
ATC TE	<i>allievo controllore</i>
ATC TR	<i>istruttore ATC</i>
ATCAS	<i>ATC Automated System</i>

ATCO	<i>Air Traffic Control Operators</i>
ATCS	<i>Servizio di controllo del traffico aereo</i>
ATM	<i>Air Traffic Management</i>
ATS	<i>Air Traffic Service</i>
ATZ	<i>Aerodrome Traffic Zone</i>
AWY	<i>AirWaYs - aerovie</i>
B.O.O.M	<i>Binocular Omni–Orientation Monitor</i>
CAVE	<i>Cave Automatic Virtual Environment</i>
CDR	<i>rotta condizionata</i>
CTR	<i>ConTRol Zone</i>
DEM	<i>Digital Elevation Map</i>
DLP <sup>TM</sup>	<i>Digital Light Processing<sup>TM</sup></i>
EFIS	<i>Electronic Flight Information Systems</i>
EICAS	<i>Engine Indicating and Crew Alerting System</i>
ENAV	<i>Ente Nazionale Assistenza al Volo</i>
FDR	<i>Flight Data Recorder</i>
FFS	<i>Fixed Flight Simulator</i>
FIR	<i>Flight Information Region</i>

FIS	<i>Servizio informazioni volo</i>
<i>FIS</i>	<i>Flight Information Service</i>
FL	<i>Flight Level</i>
FMS	<i>Flight Management System</i>
FOV	<i>Field Of View</i>
GND	<i>Ground</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
HCI	<i>Human Computer Interface</i>
HMD	<i>Head Mounted Display</i>
HMI	<i>Human Machine Interface</i>
ICAO	<i>International Civil Aviation Organization</i>
IFR	<i>Instrument Flight Rules</i>
IRU	<i>Inertial Reference Unit</i>
ITAV	<i>Ispettorato Telecomunicazioni ed Assistenza al Volo</i>
LOD	<i>Level Of Detail</i>
M&S	<i>Modelling&amp;Simulation</i>
METAR	<i>METeorological Aviation Report</i>
NDB	<i>Non-directional beacon</i>

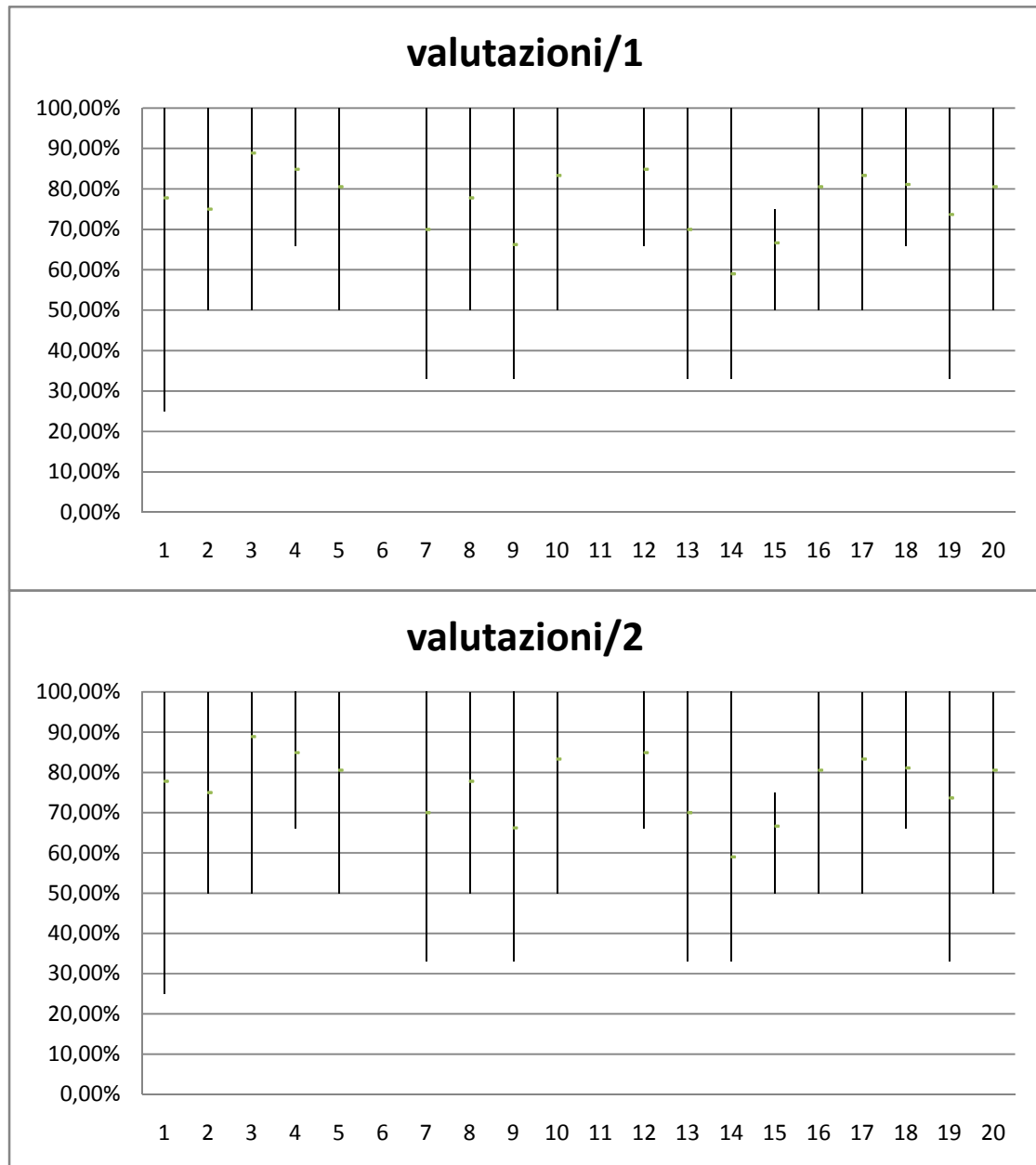
NN	<i>Neural Network</i>
PT	<i>pilota</i>
R-NAV	<i>aRea NAVigation</i>
SA	<i>Situation Awareness</i>
SC	<i>Sistemi Complessi</i>
SID	<i>Standard Instrumental Departure</i>
STAR	<i>Standard Terminal Arrival Routes</i>
TABO	<i>TABletop at uniBO</i>
TCAS	<i>Traffic Collision Avoidance System</i>
TCAS	<i>Traffic alert and Collision Avoidance System</i>
TCP/IP	<i>Transmission Control Protocol/Internet Protocol</i>
TMA	<i>Terminal Area</i>
TWR	<i>Tower Torre</i>
UAV	<i>Unmanned Aerial Vehicle</i>
UIR	<i>Upper Information Region</i>
UNL	<i>Unlimited</i>
VFR	<i>Visual Flight Rules</i>
VIEW	<i>Virtual Interface Environmental Workstation</i>

Virtual PST	<i>Passive Stereoscopic Theatre</i>
VOR	<i>VHF Omnidirectional Range</i>
VR	<i>Virtual Reality</i>





# Appendice B - Valutazione: risultati e questionari



# QUESTIONARIO DI VALUTAZIONE PER CTA/1

## DATI PERSONALI

- a) Quanti anni di esperienza hai maturato nel controllo del traffico aereo?
- b) In che tipo di controllo hai più esperienza? (metti un numero da 1 a 3 in ogni casella. 1=maggiore esperienze.....3=minore esperienza)
- TWR
  - APP
  - ACC
- c) Per i controllori TWR/APP: in quale aeroporto hai operato maggiormente?

.....

## DATI DA OSSERVAZIONE STATICA

- 1) Pensi che la rappresentazione tridimensionale (con o senza stereoscopia) possa avere vantaggi rispetto a quella bidimensionale in pianta (tipo radar)?
- |  |   |                                       |   |   |
|--|---|---------------------------------------|---|---|
| <input type="checkbox"/> Decisamente<br>no | <input type="checkbox"/> Più no che<br>sì | <input type="checkbox"/> Indifferente | <input type="checkbox"/> Più sì che<br>no | <input type="checkbox"/> Decisamente sì |
|--|---|---------------------------------------|---|---|
- 2) Pensi che l'utilizzo della stereoscopia possa avere dei vantaggi rispetto alla rappresentazione tridimensionale monoscopica?
- |  |   |                                       |   |   |
|--|---|---------------------------------------|---|---|
| <input type="checkbox"/> Decisamente<br>no | <input type="checkbox"/> Più no che<br>sì | <input type="checkbox"/> Indifferente | <input type="checkbox"/> Più sì che<br>no | <input type="checkbox"/> Decisamente sì |
|--|---|---------------------------------------|---|---|
- 3) L'esperienza di visione stereoscopica è stata...
- |  |                                     |                                       |                                    |   |
|--|-------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------|---|
| <input type="checkbox"/> Molto<br>fastidiosa | <input type="checkbox"/> Fastidiosa | <input type="checkbox"/> Indifferente | <input type="checkbox"/> Gradevole | <input type="checkbox"/> Molto<br>gradevole |
|--|-------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------|---|
- 4) Lo scenario aeroportuale è fotorealistico?
- |   |  |  |   |
|---|--|--|---|
| <input type="checkbox"/> Decisamente no | <input type="checkbox"/> Più no che sì | <input type="checkbox"/> Più sì che no | <input type="checkbox"/> Decisamente sì |
|---|--|--|---|
- 5) Pensi che la rappresentazione fotorealistica dello scenario (foto satellitare dell'aeroporto, piste, raccordi, livree del velivolo) sia utile?
- |  |   |                                       |   |   |
|--|---|---------------------------------------|---|---|
| <input type="checkbox"/> Decisamente<br>no | <input type="checkbox"/> Più no che<br>sì | <input type="checkbox"/> Indifferente | <input type="checkbox"/> Più sì che<br>no | <input type="checkbox"/> Decisamente sì |
|--|---|---------------------------------------|---|---|
- 6) Perché?
- .....
- 7) Riesci a distinguere chiaramente i velivoli (quanti sono)?
- |   |  |  |   |
|---|--|--|---|
| <input type="checkbox"/> Decisamente no | <input type="checkbox"/> Più no che sì | <input type="checkbox"/> Più sì che no | <input type="checkbox"/> Decisamente sì |
|---|--|--|---|

8) Pensi che la presenza dei coni sia utile al fine di vedere i velivoli?

☐Decisamente no      ☐Più no che sì      ☐Indifferente      ☐Più sì che no      ☐Decisamente sì

9) Riesci a distinguere la condizione dei velivoli rispetto all'aeroporto (LND – T/O - TAXI)?

☐Decisamente no      ☐Più no che sì      ☐Più sì che no      ☐Decisamente sì

10) Pensi che la colorazione dei coni sia utile per comprendere la condizione del velivolo rispetto all'aeroporto?

☐Decisamente no      ☐Più no che sì      ☐Indifferente      ☐Più sì che no      ☐Decisamente sì

11) Quali di queste informazioni relative a ciascun velivolo ti è sembrata più chiara/visibile? (metti un numero da 1 a 3 in ogni casella. 1=più chiara.....3=meno chiara)

☐ Numero del volo

☐ Quota

☐ Velocità

12) Riesci a prevedere la posizione futura dei velivoli a 1 minuto?

☐Decisamente no      ☐Più no che sì      ☐Più sì che no      ☐Decisamente sì

13) Riesci a prevedere la posizione futura dei velivoli a 5 minuti?

☐Decisamente no      ☐Più no che sì      ☐Più sì che no      ☐Decisamente sì

14) Riesci a prevedere la posizione futura dei velivoli a 10 minuti?

☐Decisamente no      ☐Più no che sì      ☐Più sì che no      ☐Decisamente sì

15) Pensi che l'impiego di *colour-coded time* sia utile per la previsione della posizione futura dei velivoli a 1 minuto?

☐Decisamente no      ☐Più no che sì      ☐Indifferente      ☐Più sì che no      ☐Decisamente sì

16) Pensi che l'impiego di *colour-coded time* sia utile per la previsione della posizione futura dei velivoli a 5 minuti?

☐Decisamente no      ☐Più no che sì      ☐Indifferente      ☐Più sì che no      ☐Decisamente sì

17) Pensi che l'impiego di *colour-coded time* sia utile per la previsione della posizione futura dei velivoli a 10 minuti?

☐Decisamente no      ☐Più no che sì      ☐Indifferente      ☐Più sì che no      ☐Decisamente sì

18) Riesci a determinare quali sono i velivoli in possibile conflitto?

☐Decisamente no      ☐Più no che sì      ☐Più sì che no      ☐Decisamente sì

19) Se sì, riesci a prevedere tra quanto tempo vi sarà il rischio di conflitto?

☐Decisamente no      ☐Più no che sì      ☐Più sì che no      ☐Decisamente sì

20) Pensi che l'impiego di *colour-coded time* sia utile per l'attività di *conflict detection*?

☐Decisamente no      ☐Più no che sì      ☐Indifferente      ☐Più sì che no      ☐Decisamente sì

## QUESTIONARIO DI VALUTAZIONE PER CTA/2

### DATI PERSONALI

- a) Quanti anni di esperienza hai maturato nel controllo del traffico aereo?
- b) In che tipo di controllo hai più esperienza? (metti un numero da 1 a 3 in ogni casella. 1=maggiore esperienze.....3=minore esperienza)

- TWR
- APP
- ACC

- c) Per i controllori TWR/APP: in quale aeroporto hai operato maggiormente?

.....

### DATI DA OSSERVAZIONE STATICA

- 1) Pensi che la rappresentazione tridimensionale (con o senza stereoscopia) possa avere vantaggi rispetto a quella bidimensionale in pianta (tipo radar)?

☐Decisamente no      ☐Più no che sì      ☐Indifferente      ☐Più sì che no      ☐Decisamente sì

- 2) Pensi che l'utilizzo della stereoscopia possa avere dei vantaggi rispetto alla rappresentazione tridimensionale monoscopica?

☐Decisamente no      ☐Più no che sì      ☐Indifferente      ☐Più sì che no      ☐Decisamente sì

- 3) L'esperienza di visione stereoscopica è stata...

☐Molto fastidiosa      ☐Fastidiosa      ☐Indifferente      ☐Gradevole      ☐Molto gradevole

- 4) Lo scenario aeroportuale è fotorealistico?

☐Decisamente no      ☐Più no che sì      ☐Più sì che no      ☐Decisamente sì

- 5) Pensi che la rappresentazione fotorealistica dello scenario (foto satellitare dell'aeroporto, piste, raccordi, livree del velivolo) sia utile?

☐Decisamente no      ☐Più no che sì      ☐Indifferente      ☐Più sì che no      ☐Decisamente sì

- 6) Perché?

.....

- 7) Riesci a distinguere chiaramente i velivoli (quanti sono)?

☐Decisamente no      ☐Più no che sì      ☐Più sì che no      ☐Decisamente sì

8) Pensi che la presenza dei coni sia utile al fine di vedere i velivoli?

☐Decisamente no      ☐Più no che sì      ☐Indifferente      ☐Più sì che no      ☐Decisamente sì

9) Riesci a distinguere la condizione dei velivoli rispetto all'aeroporto (LND – T/O - TAXI)?

☐Decisamente no      ☐Più no che sì      ☐Più sì che no      ☐Decisamente sì

10) Pensi che la colorazione dei coni sia utile per comprendere la condizione del velivolo rispetto all'aeroporto?

☐Decisamente no      ☐Più no che sì      ☐Indifferente      ☐Più sì che no      ☐Decisamente sì

11) Quali di queste informazioni relative a ciascun velivolo ti è sembrata più chiara/visibile? (metti un numero da 1 a 3 in ogni casella. 1=più chiara.....3=meno chiara)

☐ Numero del volo

☐ Quota

☐ Velocità

12) Riesci a prevedere la posizione futura dei velivoli a 1 minuto?

☐Decisamente no      ☐Più no che sì      ☐Più sì che no      ☐Decisamente sì

13) Riesci a prevedere la posizione futura dei velivoli a 5 minuti?

☐Decisamente no      ☐Più no che sì      ☐Più sì che no      ☐Decisamente sì

14) Riesci a prevedere la posizione futura dei velivoli a 10 minuti?

☐Decisamente no      ☐Più no che sì      ☐Più sì che no      ☐Decisamente sì

15) Pensi che l'impiego di *prediction line* sia utile per la previsione della posizione futura dei velivoli a 1 minuto?

☐Decisamente no      ☐Più no che sì      ☐Indifferente      ☐Più sì che no      ☐Decisamente sì

16) Pensi che l'impiego di *prediction line* sia utile per la previsione della posizione futura dei velivoli a 5 minuti?

☐Decisamente no      ☐Più no che sì      ☐Indifferente      ☐Più sì che no      ☐Decisamente sì

17) Pensi che l'impiego di *prediction line* sia utile per la previsione della posizione futura dei velivoli a 10 minuti?

☐Decisamente no      ☐Più no che sì      ☐Indifferente      ☐Più sì che no      ☐Decisamente sì

18) Riesci a determinare quali sono i velivoli in possibile conflitto?

☐Decisamente no      ☐Più no che sì      ☐Più sì che no      ☐Decisamente sì

19) Se sì, riesci a prevedere tra quanto tempo vi sarà il rischio di conflitto?

☐Decisamente no      ☐Più no che sì      ☐Più sì che no      ☐Decisamente sì

20) Pensi che l'impiego di *prediction line* sia utile per l'attività di *conflict detection*?

☐Decisamente no      ☐Più no che sì      ☐Indifferente      ☐Più sì che no      ☐Decisamente sì



# Bibliografia

- [ACARE 2004] Advisory Council for Aeronautics Research in Europe (2004), *Strategic Research Agenda 2*
- [Azuma 1996] Azuma, R., Daily, M., Krozel J. (1996), Advanced human-computer interfaces for air traffic management and simulation. *Proceedings of AIAA Flight Simulation Technologies Conference*, San Diego, CA, pp656-66.
- [Bagassi 2008a] Bagassi S., De Crescenzo F., Persiani F. (2008), Design and development of an ATC distributed training system. *Proceedings of the 8th AIAA Aviation, Technology, Integration and Operations*.
- [Bagassi 2008b] Bagassi S., De Crescenzo F., Persiani F. (2008), Design and evaluation of a 4D interface for ATC. *Proceedings of 26th Congress of the International Council of Aeronautical Sciences*.
- [Boccalatte 2005] Boccalatte A., De Crescenzo F., Flamigni F., Persiani F. (2005), A Highly Integrated Graphic Environment for Flight Data Analysis”, *XV ADM -XVII INGEGRAF International Conference*, Sevilla, Spain
- [Bourgois 2005] Bourgois M., Cooper M., Duong V., Hjalmarsson J., Lange M. and Ynnerman, A. (2005) Interactive and immersive 3D visualization for ATC. *Proceedings of ATM R&D*, Baltimore, Maryland, USA
- [Brown 1994a] Brown, M. (1994). Display for Air Traffic Control: 2D, 3D and VR. A preliminary investigation, University of London
- [Brown 1994b] Brown, M. (1994). On the evaluation of 3D Displays Technologies for Air Traffic Control, University of London

- [Burnett 1991] Burnett, M. S., Barfield, W. (1991), Perspective versus plan view air traffic control (ATC) displays: survey and empirical results. Proceedings of the Sixth International Symposium on Aviation Psychology, Columbus, Ohio State University.
- [Caplan 1990] Caplan S. (1990), Using focus groups methodology for ergonomic design, *Ergonomics* 33(5), 527-533.
- [Corradini 2002] Corradini P. and Cacciari C. (2002) The Effect of Workload and Workshift on Air Traffic Control: A Taxonomy of Communicative Problems. *Cognition, technology & work*, vol.4, pp. 229-239.
- [Crandall 2006] Crandall B., Klein G., Hoffman R. (2006), Working Minds: A Practitioner's Guide to Cognitive Task Analysis, MIT Press
- [Crystal 2004] Crystal A., Ellington B. (2004), Task analysis and human-computer interaction: approaches, techniques, and levels of analysis, Proceedings of the Tenth Americas Conference on Information Systems, New York, USA
- [De Crescenzo 2006] De Crescenzo F., Bagassi S. (2006), La creazione di standard internazionali per l'interoperabilità dei sistemi di simulazione, *The Aviation & Maritime Journal*, Gennaio-Marzo 2006, Anno 5, n°1.
- [DoD 1994] DoD Directive 5000.59 (1994), *DoD Modeling and Simulation (M&S) Management*
- [EC 2001] European Commission (2001), *European Aeronautics: A Vision for 2020*, Office for Official Publications of the European Communities
- [Eisner 2005] Howard Eisner (2005), *Managing Complex Systems: Thinking Outside the Box*, Wiley-Interscience, New York, NY, USA, ISBN: 0471690066



- [Endsley 1995] Endsley M. R. (1995), Toward a theory of situation awareness in dynamic systems, *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, Vol. 37, No. 1, pp. 32-64(33)
- [Endsley 1998] Endsley M. R., Smolensky M.W. (1998), Situation Awareness in Air Traffic Control, *Human Factors in Air Traffic Control*, San Diego: Academic Press
- [Endsley 2000] Endsley M. R. (2000) SAGAT: A situation awareness measurement tool for commercial airline pilots. *Proceedings of the Human Performance, Situation Awareness and Automation: User-Centered Design for the New Millennium*
- [Eurocontrol 2003] European Organization for the Safety of Air Navigation (2003), *The Development of Situation Awareness Measures in ATM Systems*, EUROCONTROL Technical report. Available: [http://www.eurocontrol.int/humanfactors/public/site\\_preferences/display\\_library\\_list\\_public.html](http://www.eurocontrol.int/humanfactors/public/site_preferences/display_library_list_public.html)
- [Gehr 2005] Gehr S.E., Schurig M., Jacobs L., van der Pal J. Bennett Jr. W. and Schreiber B. (2005), Assessing the Training Potential of MTDS in Exercise First Wave. *The Effectiveness of Modelling and Simulation – From Anecdotal to Substantive Evidence Meeting Proceedings*, pp. 11-16
- [Gong 2004] Gong C. McNally D. (2004) A methodology for automated trajectory prediction analysis, *Proceedings of AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit*, Providence, Rhode Island
- [Greschke 2003] Greschke D.A. and Cerutti S. (2003), B48Aircrew Mission Training via Distributed Simulation (MTDS) – Development of the Multi-Country Complex Synthetic Environment. *RTO HFM Symposium on Advanced Technologies for Military Training*

- [Hackos 1998] Hackos J., Redish J. (1998), User and Task Analysis for Interface Design, John Wiley & Sons, Inc. New York, NY, USA, ISBN:0-471-17831-4
- [Hart] Hart S.G., *NASA-Task Load Index (NASA-TLX); 20 years later*. NASA technical report. Available: <http://humansystems.arc.nasa.gov/groups/TLX/tlxpublications.html>
- [Kraiss 2006] Kraiss K.-F. (2006) *Advanced man-machine interaction*, Springer
- [Lange 2003] Lange M., Hjalmarsson J., Cooper M., Ynnerman A. and Duong V. (2003), 3D visualization and 3D voice interaction in Air Traffic Management. *Proceedings of SIGGRAD*
- [Lange 2006] Lange M, Dang T. and Cooper M. (2006) Interactive resolution of conflicts in a 3D stereoscopic environment for Air Traffic Control. *Proceedings of the 4th IEEE International Conference on Computer Sciences - RIVF'06*, Ho Chi Minh City, Viet Nam
- [Persiani 2007] Persiani F., De Crescenzo F., Fantini M. and Bagassi S. (2007) A Tabletop-Based Interface to Simulate Air Traffic Control in a Distributed Virtual Environment. *XVI ADM – XIX INGEGRAF International Conference*, Perugia, Italy
- [Reisman 2006] Reisman R., Brown D. (2006), Design of Augmented Reality Tools for Air Traffic Control Towers, 6th AIAA Aviation Technology, Integration and Operations Conference (ATIO), Wichita, Kansas, USA
- [Rozzi 2006] Rozzi S., Wong W., Woodward P., Amaldi P., Fields B., Panizzi E., Malizia A, Boccialatte A., Monteleone A., Mazzucchelli L. (2006), Developing visualizations to support spatial-temporal reasoning in ATC *Proceedings of ICRA*T, Belgrade, Serbia

- [Sheridan 2002] Sheridan, T. B. (2002), *Humans and automation*, John Wiley & Sons, Inc. New York, NY, USA
- [Tavanti 2001] Tavanti M., Lind M. (2001) 2D vs 3D implications on spatial memory. *Proceedings of IEEE Symposium on Information Visualization*
- [Wickens 1989] Wickens, C. D., Todd, S., Seidler, K. (1989), Three-Dimensional Displays: Perception, Implementation, and Applications, University of Illinois at Urbana-Champaign Aviation Research Laboratory.
- [Wickens 1994] Wickens C. D., May P. (1994) Terrain representation for air traffic control: a comparison of perspective with plan view displays. Federal Aviation Administration, System Operations & Engineering Branch, Washington D. C., Tech. Rep. ARL-94-10/FAA-94-2, 1994. Available: <http://www.humanfactors.uiuc.edu/Reports&PapersPDFs/TechReport/94-10.pdf>
- [Wickens 1998] Wickens C. D. , Mavor A. S., Parasuraman R., McGee J. P. (1998) *The Future of Air Traffic Control: Human Operators and Automation*, National Research Council.
- [Woolridge 2001] Michael Woolridge (2001), An Introduction to MultiAgent Systems, John Wiley & Sons, Inc. ISBN:047149691X
- [Yaneer 1997] Yaneer Bar-Yam (1997), Dynamics of Complex Systems, Perseus Books Cambridge, MA, USA, ISBN:0-201-55748-7.
- [Yepes 2005] Yepes J. L., Hwang I. and Rotea M. (2005) An Intent Based Trajectory Prediction Algorithm for Air Traffic Control. *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit*, San Francisco, California